

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RENATO LEÃO TAUFFER

**O EFEITO DA CARGA NORMAL NO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE
UMA SUPERLIGA DE COBALTO NO ENSAIO PINO-DISCO**

**VITÓRIA - ES
2014**

RENATO LEÃO TAUFFER

**O EFEITO DA CARGA NORMAL NO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE
UMA SUPERLIGA DE COBALTO NO ENSAIO PINO-DISCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHEIRA MECÂNICA.**

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Antônio César Bozzi

Co-orientador: Prof. Dr. Cherlio Scandian

**VITÓRIA - ES
2014**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**“O Efeito da Carga Normal no Comportamento Tribológico de uma Superliga
de Cobalto no Ensaio Pino-Disco”**

RENATO LEÃO TAUFFER

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio César Bozzi

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Orientador

Prof. Dr. Cherlio Scandian

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Co-orientador

Prof. Dr. José Daniel Bissoli de Mello

Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Examinador externo

Prof. Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Examinador Interno

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Vitória (ES), 22 de Dezembro de 2014.

DEDICATÓRIA

À Luis Augusto Tauffer

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela vida, saúde e todas as outras coisas boas que colocou em meu caminho.

A toda minha família e esposa, pelo carinho e apoio.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Ao PPGEM por todo o suporte.

Aos membros da banca pelo interesse em avaliar esse trabalho.

Ao professor orientador Dr. Antônio César Bozzi do PPGEM/UFES e ao professor co-orientador Cherlio Scandian pelas sugestões e auxílios.

Ao Técnico de laboratório Nishida, pela obtenção das micrografias com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do LCSM/UFES.

Aos colegas Leandro Entringer, Lionel Limol, Nathan Strey, Flávio Marques e Leandro Bitti por toda ajuda prestada.

Aos engenheiros Péricles e Sócrates da Reval Metal Mecânica (Serra/ES) pela disponibilização da máquina de corte por eletroerosão a fio.

RESUMO

O coeficiente de atrito e o desgaste nas superligas de cobalto são fortemente influenciados pela transformação de fase de CFC para HC que ocorre devido ao trabalho mecânico, conforme já reportado pela literatura. Após essa transformação, os valores de μ costumam se situar na faixa de 0,15 a 0,20. Este trabalho apresenta o comportamento do atrito e do desgaste em um ensaio de deslizamento sem lubrificação utilizando uma configuração pino-disco, sendo o pino feito de aço inoxidável supermartensítico e o disco de uma superliga de cobalto fundida, num tribômetro PLINT TE67. Os ensaios foram conduzidos em temperatura ambiente, com uma velocidade e variando-se a carga normal de deslizamento entre 5 e 500 N. O coeficiente de atrito e o potencial elétrico de contato foram monitorados durante os ensaios. Utilizou-se a MEV e a perfilometria 3D para caracterizar o volume e o mecanismo de desgaste. Para as cargas de 350, 400 e 450 N, após atingir condições de regime estacionário, um valor de coeficiente de atrito não usual ($\mu < 0,01$) e uma baixa taxa de desgaste foram encontradas. A análise da difração de raios-X revelou a presença de transformação de fases.

Palavras-chave: superliga de cobalto, transformação de fase, carga normal, ensaio pino-disco, baixo atrito.

ABSTRACT

It has been reported in the literature that the wear and the friction coefficient (μ) in sliding wear tests of cobalt-base alloys is strongly influenced by the phase transformation (FCC to HCP) that takes place in these alloys due to mechanical work. Usually the values of μ , after the transformation, are in the range of 0.15-0.20. The present work reports the behavior of friction and wear for the unlubricated sliding of a supermartensitic stainless steel pin on an as-cast Co-base superalloy disk, using a PLINT TE-67 tribometer. The tests were conducted at room temperature, using a single sliding speed and varying the normal load (5-500 N). The coefficient of friction and the contact potential were monitored during the tests. Scanning electron microscopy (SEM) and 3D profilometry were used to characterize the wear volume and wear mechanisms. For loads ranging from 350 to 450 N, after achieving steady-state conditions, an unusual very low friction coefficient ($\mu < 0.01$) and low wear rate were found. The X-ray diffraction analysis on the wear track revealed the mentioned transformation.

Keywords: Co-base superalloy, phase transformation, normal load, pin-on-disc test, very low friction coefficient.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Tribologia.....	3
2.2. Atrito	3
2.3. Desgaste	6
2.3.1. Galling.....	8
2.4. Superligas.....	10
2.4.1. Propriedades Mecânicas	11
2.4.2. Fases nas superligas de cobalto	12
2.5. Comportamento Tribológico das Superligas de Cobalto	12
2.5.1. Efeito da Energia de Falha de Empilhamento.....	12
2.5.2. Transformação de Fase.....	14
2.5.3. Formação de uma Camada Facilmente Cisalhável.....	16
2.5.4. Endurecimento da Camada Sub-superficial.....	17
2.5.5. Influência dos óxidos	17
2.5.6. Sistema de baixo atrito	18
2.5.7. Stellite® Alloy 250	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1. Materiais.....	21
3.1.1. Pino.....	21
3.1.2. Disco	22
3.2. Métodos	22
3.2.1. Preparação das Amostras	22
3.2.1.1. Limpeza.....	22
3.2.1.2. Superfície	23
3.2.2. Configuração do Tribômetro	23
3.2.3. Relação de Cargas Utilizadas.....	24
3.2.4. Avaliação da força de atrito	24
3.2.5. Calibração do tribômetro PLINT TE67.....	24
3.2.6. Duração e Condições Ambientais.....	25
3.2.7. Volume de Desgaste	25
3.2.8. Caracterização das Amostras.....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1. Caracterização dos materiais	27
4.1.1. Pino.....	27
4.1.2. Disco	28
4.2. Descrição dos ensaios e discussão	30
4.2.1. Fenômeno do Baixo Atrito	52
4.2.1.1. 1ª Etapa – Médio Atrito, Médio Desgaste.....	53
4.2.1.2. 2ª Etapa – Alto Atrito, Alto Desgaste.....	53
4.2.1.3. 3ª Etapa – Baixíssimo Atrito, Baixo Desgaste.....	54
4.2.2. Transformação de Fase.....	54
4.2.3. Endurecimento Sub-superficial.....	58

4.2.4. <i>Potencial elétrico de contato</i>	59
4.2.5. <i>Formação de uma Fina Camada Facilmente Cisalhável</i>	61
5. CONCLUSÕES	62
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

Lista de Figuras

Figura 2-1 – Atrito Coulombiano. [2]	4
Figura 2-2 – Principais mecanismos de desgaste.	6
Figura 2-3 – Faixas da taxa de desgaste específica de materiais metálicos deslizando sob diferentes condições de lubrificação (Dados de Archard, 1953; Bhansali, 1980; Hirst, 1957; Hokkirigawa, 1997; Holm, 1946; Lancaster, 1978; Rabinowicz, 1980) [10].	7
Figura 2-4 – Galling na superfície de um aço inoxidável 316 deslizando sobre um contra-corpo similar com 1000 N de [3].	9
Figura 2-5 – Efeito da energia de falha de empilhamento no galling.....	13
Figura 2-6 – Efeito da razão c/a na tendência ao galling.....	15
Figura 2-7 – Fases e orientações da camada de cobalto detectadas via análise de difração de raios-X; (a) a microestrutura da superfície “intacta” é CFC fortemente texturizada na família de direções <100>; (b) após trabalho mecânico, formação de HC. [23].....	15
Figura 2-8 – Canto superior esquerdo: Imagem produzida a partir de STEM (scanning transmission electron microscopy – microscopia eletrônica de transmissão e varredura) de uma seção transversal revela uma camada superficial de 30 nm na trilha de desgaste. Canto superior direito: A análise da difração de raios convergentes indica que essa camada superficial consiste basicamente de planos basais HC paralelos à superfície de desgaste. As 5 figuras na parte de baixo: Mapas feitos com a utilização de EDS – energia dispersiva de raios-X – (Co, Cr e Mo) e mapas feitos com EFTEM – microscopia eletrônica de transmissão por energia filtrada – (C e O) revelam uma região rica em Cr, Mo e C (no lado esquerdo) cercada pelo substrato e a camada superficial rica em Co.[25]	16
Figura 2-9 – Perfil de dureza abaixo da superfície de Stellites® 6 e 21 (HV _{0,025}). [24]	17
Figura 2-10 – Evolução do coeficiente de atrito com o aumento da carga em atmosfera de: (a) Ar e (b) Argônio. [23].....	18
Figura 2-11 – Sistema autorregenerável de baixo atrito dos Stellites, típico de deslizamento em altas cargas. [24].....	19
Figura 2-12 – Coeficiente de atrito em função da carga em temperatura ambiente. Neste gráfico também está representado a evolução do atrito para o NOREM 02 (composição Fe bal., 25,1% Cr, 4,13% Ni, 1,23% C, 3,23% Si, 4,4% Mn, 2,03% Mo e 0,18% N). [28].....	20
Figura 3-1 – Superfície do pino como recebido (torneada) e após o lixamento.	23
Figura 3-2 – Dispositivos utilizados para a aferição das células de carga.	25
Figura 3-5 – Perfil representativo da região da trilha de desgaste, utilizado para calcular o volume de desgaste e coeficiente dimensional de desgaste.....	26
Figura 4-1 – Microestruturado pino.	28
Figura 4-2 – Microestrutura do disco.	29
Figura 4-3 – Uma outra visão da microestrutura do disco.	29
Figura 4-4 – Coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio utilizando 5 N de carga normal.	30
Figura 4-5 – Coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio utilizando 18,7 N de carga normal.....	31
Figura 4-6 – Coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio utilizando 62,9 N de carga normal.....	31
Figura 4-7 – Coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio utilizando 110 N de carga normal.....	31
Figura 4-8 – Coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio utilizando 220 N de carga normal.....	32

<i>Figura 4-9 – Evolução do valor médio do atrito com o aumento da carga.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4-10 – Volume de desgaste em função da carga normal para ensaios com carga entre 5 e 220 N.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4-11 – Perfil topográfico mostrando a trilha de desgaste para 5 N de carga normal.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4-12 – Perfil topográfico mostrando a trilha de desgaste para 220 N de carga normal.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4-13 – Trilha de desgaste para a carga normal de 5 N.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4-14 – Trilha de desgaste para a carga normal de 220 N.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4-15 – Sulcos plásticos e deposição de material na trilha de desgaste (220 N de carga normal).</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4-16 – Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio com 350 N de carga normal.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4-17 – Trilha de desgaste para a carga normal de 350 N.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4-18 – Perfil topográfico mostrando a trilha de desgaste para 350 N de carga normal.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4-19 – Pinos utilizados em ensaios com carga normal de 350 N – (a) ensaio sem resultado de baixo atrito (b) ensaio tendo como resultado um baixo atrito.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4-20 – Análise EDS da trilha de desgaste para um ensaio utilizando carga normal de 350 N. Composições apenas das regiões 1, 4, 5 e 6.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4-21 – Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio com 400 N de carga normal.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4-22 – Trilha de desgaste para a carga normal de 400 N – com baixo atrito.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4-23 – Trilha de desgaste para a carga normal de 400 N – com baixo.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4-24 – Trilha de desgaste para a carga normal de 400 N – sem baixo atrito.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4-25 – Perfil topográfico mostrando a trilha de desgaste para 400 N de carga normal.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4-26 – Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio com 450 N de carga normal.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4-27 – Trilha de desgaste para a carga normal de 450 N.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4-28 – Perfil topográfico mostrando a trilha de desgaste para 450 N de carga normal.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4-29 – Análise EDS da trilha de desgaste para um ensaio utilizando carga normal de 450 N.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4-30 – Pino após ensaio utilizando carga normal de 450 N.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4-31 – Pino após ensaio utilizando carga normal de 450 N – detalhe da borda.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4-32 – Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio com 500 N de carga normal.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4-33 – Trilha de desgaste para a carga normal de 500 N.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4-34 – Perfil topográfico mostrando a trilha de desgaste para 450 N de carga normal.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4-35 – Pino após ensaio utilizando carga normal de 500 N – seta indicando a protusão.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4-36 – Protusão formada no pino – detalhes da Figura 4-37.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4-37 – Comportamento para o disco do volume de desgaste com o aumento da carga.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4-38 – Comportamento para o disco do coeficiente de desgaste dimensional com o aumento da carga.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4-39 – Evolução da trilha de desgaste com o aumento da carga normal – Microscópio Estereoscópico – Cargas: (a) 5N; (b) 18,7 N; (c) 62,9 N; (d) 110 N; (e) 220 N; (f) 350 N; (g) 400 N; (h) 450 N e (i) 500 N.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4-40 – Comparação antes e depois da limpeza do pino no 5º ensaio utilizando 400 N de carga normal – Influência do magnetismo do pino na atração dos debris.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4-41 – Evolução do coeficiente de atrito típico nos ensaios que resultaram em um baixíssimo atrito.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4-42 – Difratograma de raios-X das amostras nas condições “como recebido” e da trilha de desgaste.</i>	<i>55</i>

<i>Figura 4-43 – Difratoograma de raios-X de um Stellite® 21 sem deformação plástica observável (marcado com um +) e após o desgaste (marcado com um ·). As barras indicam as posições esperadas e as intensidades relativas dos picos de difração de um material policristalino, não texturizado em CFC e solução sólida rica em Co HC, respectivamente. [24]</i>	55
<i>Figura 4-44 – Difratoograma de raios-X de uma amostra do Alloy 250 obtida via eletroerosão.</i>	56
<i>Figura 4-45 – Comparação dos espectros de difração de raios-X das amostras de Alloy 250.</i>	57
<i>Figura 4-46 – Evolução dos picos HC com o aumento da carga.</i>	58
<i>Figura 4-47 – Perfil de dureza da seção transversal da trilha de desgaste.</i>	59
<i>Figura 4-48 – Evolução no tempo do coeficiente de atrito e do potencial de contato – 350 N – 2º ensaio.</i>	59
<i>Figura 4-49 – Evolução no tempo do coeficiente de atrito e do potencial de contato – 400 N – 2º ensaio.</i>	60
<i>Figura 4-50 – Evolução no tempo do coeficiente de atrito e do potencial de contato – 450 N – 1º ensaio.</i>	60
<i>Figura 4-51 – Evolução no tempo do coeficiente de atrito e do potencial de contato – 450 N – 2º ensaio.</i>	60
<i>Figura 4-52 – Evolução no tempo do coeficiente de atrito e do potencial de contato – 450 N – 3º ensaio.</i>	61

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2-2 – Energia de falha de empilhamento de alguns metais comuns.</i>	13
<i>Tabela 3-1 – Composição química do pino conforme fornecida pelo fabricante.</i>	21
<i>Tabela 3-2 – Composição química do disco conforme fornecida pelo fabricante.</i>	22
<i>Tabela 3-3 – Relação das cargas normais utilizadas e as respectivas pressões de contato nominal.</i>	24

Lista de Siglas e Abreviaturas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI: American Iron and Steel Institute

ASTM: American Society for Testing and Materials

EFE: Energia de Falha de Empilhamento

LABTECMEC/UFES: Laboratório de Tecnologia Mecânica

LCSM/UFES: Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais

MEV: Microscopia eletrônica de varredura

NBR: Norma Brasileira

TRICORRMAT/UFES: Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais

STEM: Microscopia Eletrônica de Transmissão e Varredura

EDS: Energia Dispersiva de Raios-X

MET: Microscopia Eletrônica de Transmissão

EFTEM: Microscopia Eletrônica de Transmissão por Energia Filtrada

Lista de Símbolos

HV: Dureza Vickers

HRC: Dureza Rockwell C

HRB: Dureza Rockwell B

μm : Micrômetro

N: Newton

Sa: Parâmetro de Rugosidade Superficial média aritmética

Sq: Parâmetro de Rugosidade Superficial média geométrica

1. INTRODUÇÃO

Uma estimativa econômica feita em 1992 [1] mostrou que cerca de 1% a 6% do produto interno bruto dos países desenvolvidos é perdido com os efeitos do desgaste e do atrito e que cerca de 20% desses gastos poderiam ser evitados com a aplicação na indústria dos conhecimentos já existentes sobre tribologia.

O desgaste por deslizamento tem significativa importância na indústria, como, por exemplo, no setor metalmecânico, onde existe grande contato metal-metal, muitas vezes sem a presença de lubrificantes.

Na fabricação de tubos de aço inoxidável sem costura, um dos materiais utilizados como guias de laminação são as superligas de cobalto. Sua utilização se deve à grande resistência ao choque térmico, capacidade de manter sua resistência mecânica mesmo em altas temperaturas e boa resistência ao galling.

Na década de 70, Chow et alli [2] realizaram estudo para identificar ligas de cobalto candidatas a atuar em reatores nucleares. Na década de 80, Miller et al [3] explica a influência da energia de falha de empilhamento na boa resistência das superligas de cobalto ao galling.

No intuito de encontrar um material que pudesse substituir as superligas de cobalto como assento de válvulas na indústria nuclear, Persson et ali [4,5,6,7], nos anos 2000, realizaram diversos estudos. Estes podem ser considerados o atual estado-da-arte no que tange o comportamento do atrito e desgaste das superligas Stellite®.

Este trabalho tem como objetivo analisar o efeito da carga no comportamento tribológico de uma superliga de cobalto utilizando o ensaio pino-disco. Para tanto,

variou-se a carga de 5 a 500 N mantendo-se todos os outros parâmetros iguais. A velocidade de deslizamento utilizada foi 0,4 m/s por estar compatível com aquela presente na fabricação de tubos de aço inoxidável sem costura.

Primeiramente, tem-se uma revisão bibliográfica a respeito dos principais temas abordados nessa dissertação. Em seguida, a descrição dos materiais e métodos utilizados. Depois, a apresentação e discussão dos resultados, finalizando com a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos próximos tópicos será apresentada a revisão bibliográfica com os principais assuntos apresentados nessa dissertação.

2.1. Tribologia

A tribologia é um ramo multidisciplinar da ciência e tecnologia, envolvendo áreas como engenharia, física, química e até mesmo biologia. Pode ser definida como a ciência e a tecnologia das interações de superfícies em movimento relativo e embarca o estudo do atrito, desgaste e lubrificação [8].

2.2. Atrito

Atrito é a resistência encontrada por um corpo enquanto desliza sob outro. Nas máquinas que realizam movimentos, o atrito é responsável pela dissipação e perda de muita energia. Estima-se, por exemplo, que 10% do consumo de óleo nos Estados Unidos da América é utilizado simplesmente para se vencer o atrito [9].

As “leis universais” do atrito, creditadas a Da Vinci, Amontons e Coulomb, possuem validade limitada; não são observáveis em todos os casos. O atrito coulombiano falha por não prever nenhuma dissipação líquida de energia no ciclo A-B-C, como mostrado na Figura 2-1; logo, nenhuma força de atrito seria observável numa escala macroscópica caso as superfícies seguissem exatamente este modelo [8].

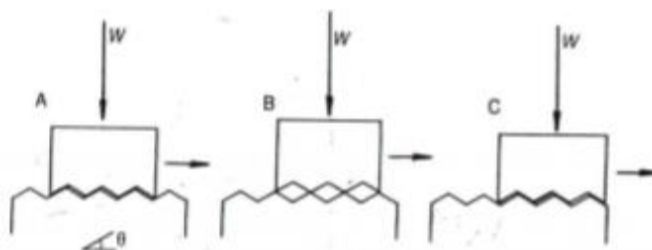


Figura 2-1 – Atrito Coulombiano. [8]

A maioria das teorias do atrito devido ao deslizamento tem sua base nos trabalhos de Bowden e Tabor, realizados entre os anos 30 e 70. O modelo produzido por eles, em sua forma mais simples, supõe que a força de atrito surge de duas fontes: uma força adesiva e uma força devido à deformação [8]. Pelo modelo proposto por eles, pode-se extrair que um sistema “otimizado” para se obter um baixo atrito deve possuir um substrato duro, provendo uma pequena área de contato real, e uma camada superficial fina, macia e facilmente cisalhável [10].

Apesar das diversas teorias e modelos para explicar o fenômeno do atrito, seu estudo é algo extremamente complexo. Blau [11] aponta 11 maneiras diferentes de se dissipar a energia no contato, quais sejam:

- Calor proveniente do atrito;
- Criação/quebra das ligações adesivas;
- Ordenamento/desordenamento de moléculas na superfície;
- Deformação elástica de um ou ambos os sólidos;
- Geração de ondas sonoras ou vibrações;
- Deformação plástica de um ou ambos os sólidos;
- Fratura de um ou ambos os sólidos;
- Criação de defeitos ou transformações de fases em um ou ambos os materiais;
- Promoção de reações químicas superficiais;

- Perdas viscosas no meio interposto (se existir) e
- Compressão ou redistribuição do debris de desgaste interfacial.

Além dessas diversas maneiras de se dissipar a energia, deve-se levar em conta outros fatores que influenciam no atrito como: a geometria de contato, as propriedades dos fluidos (assim como sua reatividade) envolvidos no contato, o movimento relativo, as forças aplicadas, o terceiro corpo, a temperatura, a rigidez e as vibrações [12].

Como a energia pode ser dissipada de diversas formas, dois pares deslizantes exibindo o mesmo coeficiente de atrito podem ter taxas de desgaste muito diferentes pois a energia é dividida de forma diferente [13]. Em outras palavras, quantidades como coeficiente de atrito e desgaste, isoladamente consideradas, não fornecem descrições confiáveis do que realmente está acontecendo no contato.

Existe um relacionamento, uma ação recíproca, do atrito e do desgaste com o “envelhecimento” ou a evolução do sistema tribológico com o tempo. Por exemplo, o cisalhamento pode levar a um acúmulo de danos ao ponto de ocasionar uma fratura, causando o desprendimento de partículas. Estas alteram a resistência ao atrito, afetando, assim, a energia disponível para continuar a gerar e eliminar da zona de contato novas partículas. Concomitantemente, a interface pode estar aquecendo, modificando as propriedades mecânicas e a reatividade das superfícies [14].

Diante de tantos fatores e variáveis, fica patente que o atrito não é uma propriedade intrínseca do sistema; é, na verdade, sistêmico [15].

2.3. Desgaste

Desgaste é o fenômeno da remoção de material ou dano de uma superfície devido à interação com uma outra superfície, não sendo uma propriedade dos materiais, mas sim uma resposta do sistema [16].

Utilizando a terminologia de Zum Gahr, distingui-se os mecanismos desgaste em 4 tipos principais – adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica. A adesão se caracteriza pela formação e quebra de ligações adesivas interfaciais enquanto a abrasão é a remoção de material devido ao riscamento. A fadiga superficial trata da fadiga e formação de trincas superficiais devido estresses cíclicos tribológicos. A ação do mecanismo de reação triboquímica se dá com a formação de produtos de reações químicas que são resultados de interações entre elementos do tribossistema iniciadas por reações tribológicas. A seguir, a Figura 2-2 ilustra estes 4 principais mecanismos de desgaste [17]:

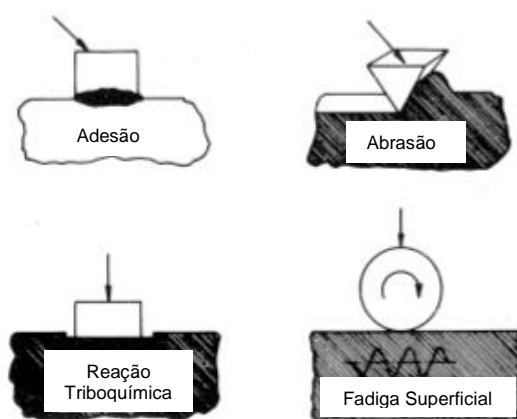


Figura 2-2 – Principais mecanismos de desgaste. [17]

Os mecanismos de desgaste podem ser descritos levando-se em consideração mudanças complexas durante o processo. O conhecimento dos diferentes mecanismos é importante, pois, normalmente, não atuam de forma isolada.

Dependendo das condições de lubrificação, o desgaste costuma se situar em diferentes níveis, como mostra a Figura 2-3.

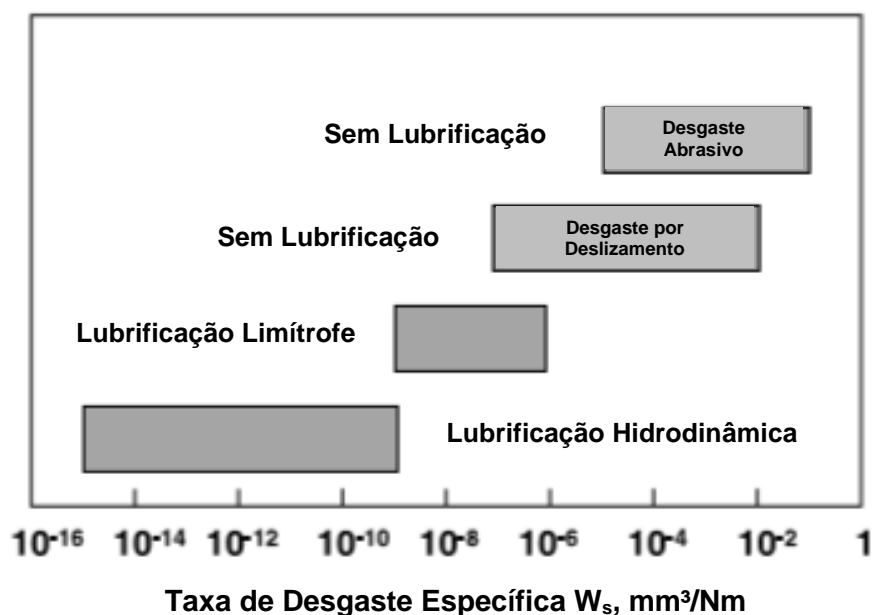


Figura 2-3 – Faixas da taxa de desgaste específica de materiais metálicos deslizando sob diferentes condições de lubrificação (Dados de Archard, 1953; Bhansali, 1980; Hirst, 1957; Hokkirigawa, 1997; Holm, 1946; Lancaster, 1978; Rabinowicz, 1980) [16].

De forma geral, o desgaste é estimado pela quantidade de volume perdido e pelo estado da superfície de desgaste. O grau do desgaste é descrito pela taxa de desgaste, taxa de desgaste específica ou coeficiente de desgaste. A taxa de desgaste é definida como volume perdido por distância deslizada. O desgaste específico é definido como o volume de desgaste pela distância deslizada e a carga. Já o coeficiente de desgaste, como o produto da taxa específica de desgaste e a dureza do material desgastado [16].

O desgaste por deslizamento ocorre quando duas superfícies deslizam entre si, com ou sem lubrificação. A adesão ocorre no contato das asperezas na interface, sendo estes contatos cisalhados pelo deslizamento, o que pode provocar o

desprendimento de um fragmento de uma superfície com a consequente ligação deste a outra. Prosseguindo o deslizamento, os fragmentos transferidos podem sair da superfície a que aderiram e voltar para a original ou mesmo se desprender e sair, ou não, do contato [18].

Sabe-se que as taxas atrito e desgaste podem mudar de forma repentina conforme o deslizamento prossegue, o que se denomina de transição de atrito e/ou desgaste [19].

Os efeitos da dureza são bem conhecidos no desgaste abrasivo, porém, no desgaste por deslizamento, são muito mais variados e complexos [20]. A transferência e a mistura mecânica podem modificar a dureza relativa da superfície dos componentes em deslizamento. A dureza desta mistura será maior ou menor do que a do substrato, o que determinará se será pressionada para dentro da superfície ou permanecerá nesta como fragmentos ou platôs [19].

2.3.1. *Galling* ou Engripamento

O engripamento, mais conhecido na literatura por *galling*, pode ser considerado uma forma severa de desgaste adesivo, normalmente ocorrendo sob altas cargas e lubrificação deficiente, causando grande dano superficial em componentes metálicos em deslizamento. Este dano é caracterizado por transferências macroscópicas localizadas de materiais, ou seja, grandes fragmentos ou protrusões superficiais facilmente visíveis em uma ou ambas as superfícies (Figura 2-4), sendo o travamento (*seizure*) um possível resultado desta forma de desgaste [9]. A norma ASTM G40 diz que o *galling* é uma forma de dano superficial decorrente do deslizamento de dois sólidos, distinguido pela criação de protrusões

macroscópicas incluindo, normalmente, escoamento plástico, transferência de material ou ambos [21].

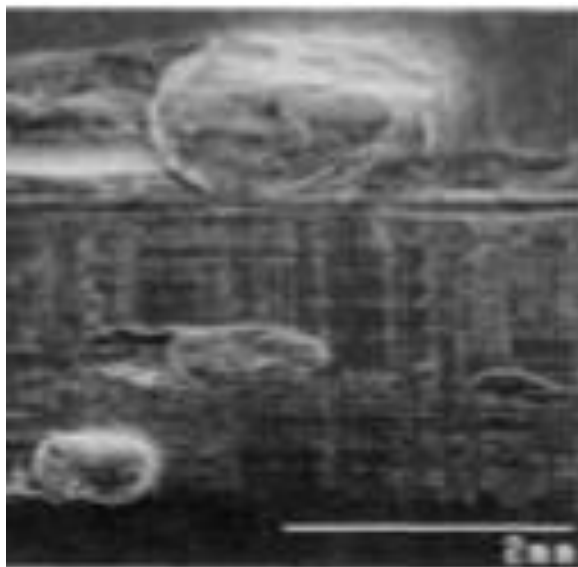


Figura 2-4 – *Galling* na superfície de um aço inoxidável 316 deslizando sobre um contra-corpo similar com 1000 N de [9].

Markov e Kelly [21], tentaram unificar todas as definições de desgaste adesivo severo (o que inclui o *galling*), num processo que denominaram de “desgaste catastrófico iniciado pela adesão”. Este tipo de desgaste seria caracterizado pela concentração da carga normal e localização do escoamento plástico em uma ou ambas as superfícies deslizantes dentro de uma pequena área (o centro do tal desgaste catastrófico) resultando na rápida formação de protrusões e alargamento das ranhuras, no aumento da rugosidade superficial e da taxa de desgaste. Para eles, o *galling* é caracterizado pela transferência de material de uma superfície macia, antes de se aquecer significativamente, para uma superfície mais dura.

Materiais com baixa ductilidade são menos suscetíveis ao *galling*, pois, sob altas cargas, as asperezas superficiais tendem a se fraturar quando interagem. Já

nos materiais altamente dúteis, as asperezas tendem a se deformar plasticamente, aumentando assim a área de contato do par deslizante, podendo levar ao *galling*.

O *galling* e o travamento são os piores resultados possíveis de um sistema mecânico em movimento relativo [9]. Se um par tribológico trava, não existirá realmente um coeficiente de atrito a se registrar, mas apenas o fato ocorrido. Caso ocorra *galling*, a força de atrito tende a cair, porém com grandes danos superficiais. É preciso ficar atento aos dados produzidos nestas condições, pois, apesar de parecer que o par está trabalhando adequadamente (devido ao baixo coeficiente de atrito), o fenômeno do *galling* já ocorreu e os danos superficiais podem ser maiores que os aceitáveis para determinada utilização.

É importante se ter em mente que um pequeno desgaste volumétrico pode não ser um verdadeiro indicador do comportamento do desgaste [3].

2.4. Superligas

A necessidade de se obter ligas que, além de possuir considerável resistência mecânica em altas temperaturas, fossem resistentes à corrosão nessas altas temperaturas, impulsionou o desenvolvimento das superligas. Estas ligas são geralmente empregadas em temperaturas acima de 1000°F (aproximadamente 540°C), tendo como elementos-base o cobalto, o níquel e/ou ferro [22].

As superligas de cobalto são utilizadas em diversas aplicações, como: componentes de turbinas a gás (como parafusos, aletas, discos e eixos), equipamentos de processamento de metais (componentes de fornos), indústria química, petroquímica e nuclear (reatores, válvulas e bombas).

2.4.1. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas das superligas de cobalto são diretamente relacionadas com seus procedimentos de fundição, trabalho mecânico e, acima de tudo, ao tratamento térmico realizado após a forjamento, conformação ou fundição. O processamento é a chave para se obter as propriedades ideais para cada situação. A estrutura dos grãos é desenvolvida nessa fase. Mudanças microestruturais são invariavelmente produzidas pela dissolução de todos (ou da maioria) dos carbonetos e outros precipitados intermetálicos, causando sua redistribuição de forma apropriada [23].

O endurecimento nas superligas é feito por solução sólida, encruamento, precipitação e transformação de fase (de CFC para HC) induzida pela deformação. As superligas de cobalto são invariavelmente fortalecidas por uma combinação de carbonetos e solução sólida. A distinção essencial está entre as estruturas fundidas e forjadas [23].

As ligas forjadas, além de mais dúteis, são mais homogêneas do que as fundidas – estas apresentam segregação causada pelo processo de solidificação. As ligas fundidas dependem muito mais do que as forjadas do endurecimento através dos carbonetos [24].

Em condições de pressão atmosférica (1 atm) e temperatura ambiente (por volta de 25°C), o cobalto puro possui estrutura cristalina hexagonal compacta (HC). No entanto, quando utilizado em superligas, passa por uma transformação que ocorre em altas temperaturas ou na presença de elementos de liga e “estabiliza-se” na forma cristalina cúbica de face centrada (CFC). Essa “estabilidade” é, na verdade, apenas uma metaestabilidade; existe uma tendência de retorno à sua estrutura HC.

Esta estabilização é obtida com a utilização de níquel (10% ou mais). No entanto, este pode ser substituído por ferro, manganês ou carbono.

2.4.2. Fases nas superligas de cobalto

As superligas consistem de uma matriz austenítica CFC (γ) mais uma variedade de fases secundárias. Os carbonetos MC, $M_{23}C_6$, M_6C e o raro M_7C_3 são fases secundárias importantes em praticamente todas as superligas, sendo de grande valor no controle das propriedades mecânicas. É a produção e o controle dessas fases – juntamente com o tamanho de grão, morfologia, trabalho a frio – que proporcionam às superligas suas características únicas. [23]

2.5. Comportamento Tribológico das Superligas de Cobalto

Nesta seção, serão discutidos o efeito da energia de falha de empilhamento, a transformação de fase que ocorre no cobalto, a formação de uma fina camada superficial orientada e o endurecimento sub-superficial.

2.5.1. Efeito da Energia de Falha de Empilhamento

Para materiais CFC, a energia de falha de empilhamento (EFE) costuma ser um bom indicador da tendência ao deslizamento cruzado (também chamado de *cross-slip*). Uma alta energia de falha de empilhamento em um material indica um baixo número falhas de empilhamento. Uma vez que estas falhas são responsáveis por “barrar” o deslizamento de discordâncias, quanto menor o número daquelas, maior a tendência do material a apresentar o fenômeno do *galling* [3]. A seguir, a Figura 2-5 resume esta ideia:

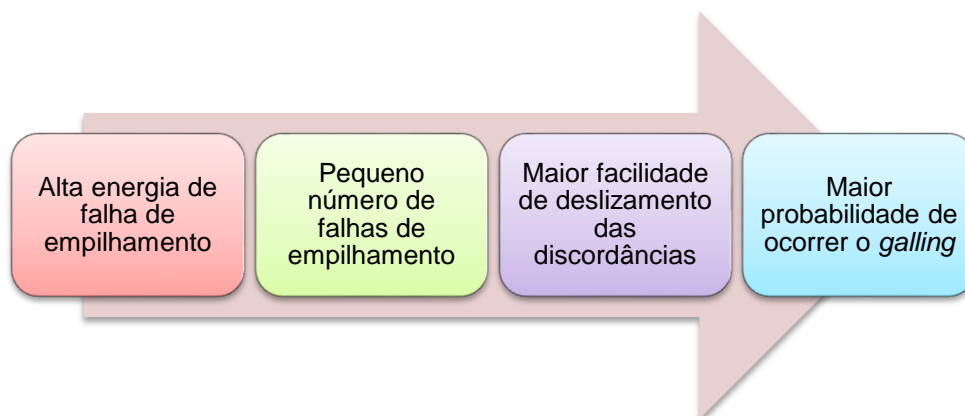


Figura 2-5 – Efeito da energia de falha de empilhamento no galling.

A Tabela 2-1 a seguir mostra a energia de falha de empilhamento para alguns elementos.

Metais	Energia de Falha de Empilhamento, eVgs/cm ²
Ouro	30
Cobre	40
Níquel	80
Alumínio	200

Tabela 2-1 – Energia de falha de empilhamento de alguns metais comuns.

O níquel e o alumínio possuem baixa resistência ao *galling*, sendo o contrário verdadeiro para o ouro e cobre. As superligas de cobalto (como os Stellites®) estão entre os materiais com ótimas propriedades para resistir a esse fenômeno. Isto se deve, em grande parte, a pequena energia de falha de empilhamento do cobalto.

A adição de níquel a uma liga baseada em cobalto diminui a probabilidade de falhas de empilhamento, ou seja, aumenta a energia de falha de empilhamento. O ferro também influi bastante sobre a energia de falha de empilhamento, devido à elevada solubilidade desses elementos no cobalto. Elementos que apresentam estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), como o tungstênio e o molibdênio, reduzem a energia de falha de empilhamento, favorecendo a dissociação de discordâncias, de tal modo que a liga de cobalto torna-se mais dura e menos dútil.

Por outro lado, a adição de ferro e de níquel contrabalança este efeito, ao estabilizar a fase CFC e reduzir a dissociação de discordâncias [25].

Quanto menor a energia de falha de empilhamento, maior será o distanciamento das falhas e, portanto, maior será a tensão necessária para a constrição e deslizamento cruzado. Assim, a diminuição da EFE pode aumentar a taxa de encruamento [3].

As falhas de empilhamento, além de endurecerem o material ao dificultar o deslizamento cruzado (conseqüentemente a movimentação de discordâncias, favorecendo a formação de carbonetos, ao atuarem como locais para a nucleação destes). Após envelhecimento forma-se uma fina dispersão de carbetos que contribuem para aumentar a resistência à tração e à fluência [26].

2.5.2. Transformação de Fase

O cobalto (e suas ligas), após sofrer trabalho mecânico, passa a ter uma estrutura hexagonal compacta (HC). Essa transformação CFC-HC do cobalto é designada por martensítica devido ao seu caráter adifusional, sua considerável histerese térmica e a típica nucleação e processo de crescimento. Essa transformação possui um efeito de “memória” que diz respeito a orientação relativa das estruturas CFC e HC, quando passando pela transição. Além disso, a temperatura de transformação T_M , assim como a quantidade e extensão das estruturas transformadas, é drasticamente afetada por vários fatores como tensões externas, ligas com átomos solúveis (como Fe e Ni) ou com elementos metálicos e não-metálicos com um espectro de solubilidade limitado [27].

A estrutura cristalina hexagonal compacta possui uma alta razão dos parâmetros de rede c/a , o que indica uma maior facilidade de deslizamento cruzado

ao longo do plano basal do que através dos planos prismáticos e piramidais. Quanto menor essa razão, maior a tendência de deslizamento e, também, do aparecimento do *galling* [3]. A seguir, a Figura 2-6 mostra esquematicamente essa sequência de fatores:

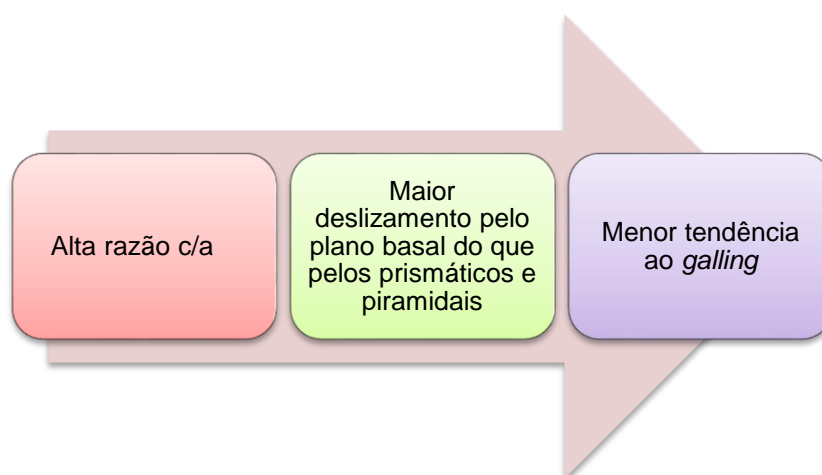


Figura 2-6 – Efeito da razão c/a na tendência ao galling.

Persson et al [4], verificaram que os Stellite® 6 e 21, quando submetidos a altas cargas, apresentam tal transformação, como evidenciado pela Figura 2-7.

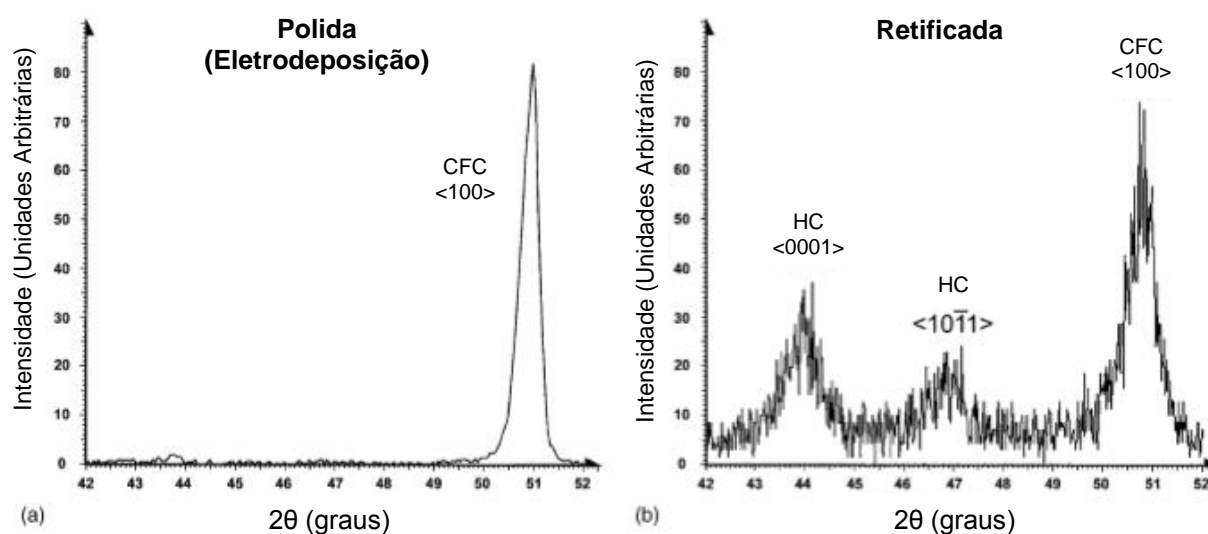


Figura 2-7 – Fases e orientações da camada de cobalto detectadas via análise de difração de raios-X; (a) a microestrutura da superfície “intacta” é CFC fortemente texturizada na família de direções <100>; (b) após trabalho mecânico, formação de HC. [4]

2.5.3. Formação de uma Camada Facilmente Cisalhável

A formação de uma camada facilmente cisalhável é muito importante, pois é grande responsável por manter o atrito em baixos patamares. No caso dos Stellites, atua como um lubrificante sólido, com um mecanismo que lembra o grafite [5].

Persson et al [5, 6], com o auxílio de um MET (microscópio eletrônico de transmissão) determinaram a espessura dessa camada para um Stellite® 21, tendo encontrado um valor de 30nm, consistindo de planos basais de uma estrutura HC altamente orientados paralelamente à direção do deslizamento [6]. Isto está mostrado na Figura 2-8.

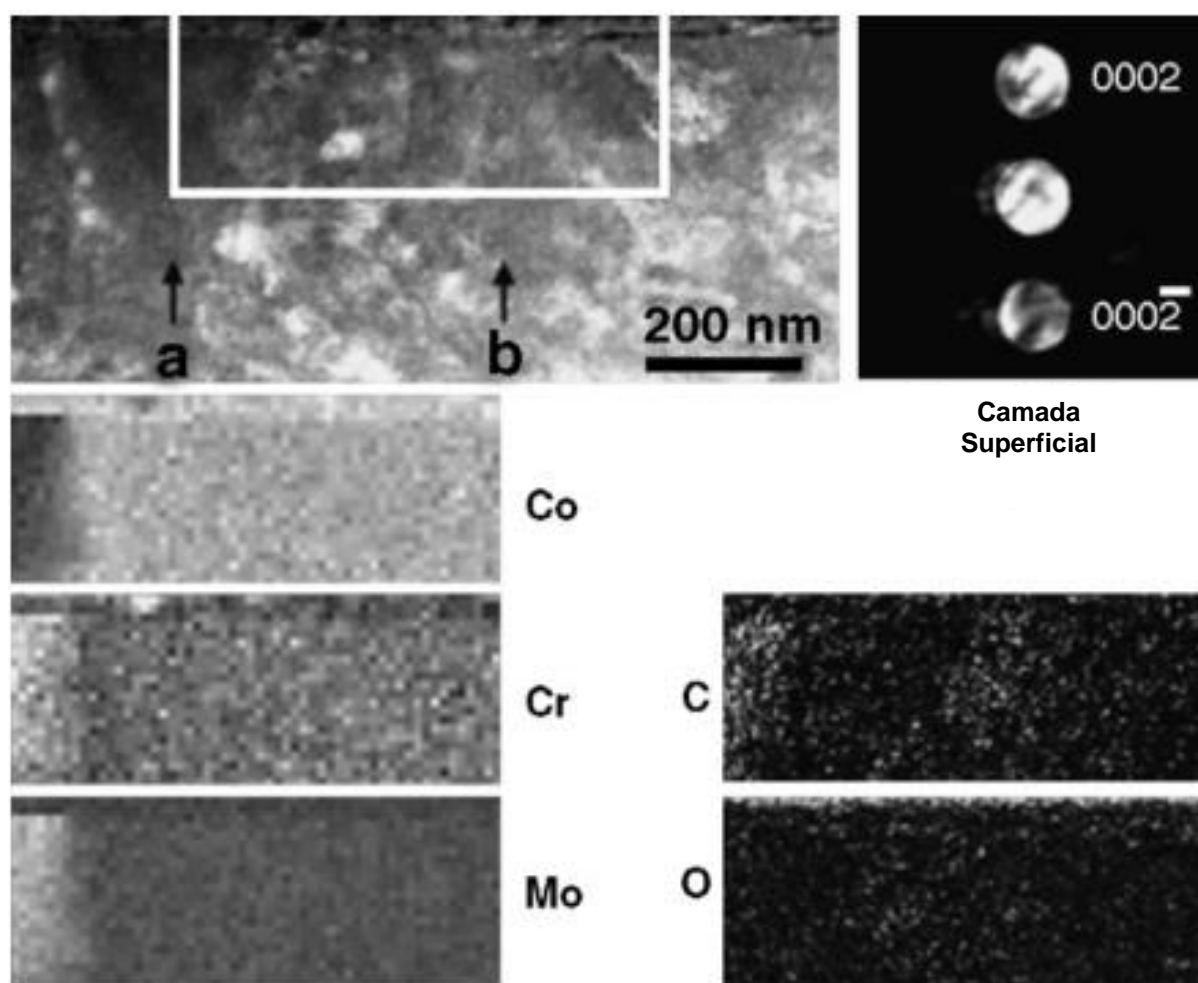


Figura 2-8 – Canto superior esquerdo: Imagem produzida a partir de STEM (*scanning transmission electron microscopy* – microscopia eletrônica de transmissão e varredura) de uma seção transversal revela uma camada superficial de 30 nm na trilha de desgaste. Canto superior direito: A análise da

difração de raios convergentes indica que essa camada superficial consiste basicamente de planos basais HC paralelos à superfície de desgaste. As 5 figuras na parte de baixo: Mapas feitos com a utilização de EDS – energia dispersiva de raios-X – (Co, Cr e Mo) e mapas feitos com EFTEM – microscopia eletrônica de transmissão por energia filtrada – (C e O) revelam uma região rica em Cr, Mo e C (no lado esquerdo) cercada pelo substrato e a camada superficial rica em Co.[6]

2.5.4. Endurecimento da Camada Sub-superficial

Além da formação de uma fina camada superficial, o endurecimento da camada sub-superficial capaz de suportar a carga é também um fator importante para manter o coeficiente de atrito baixo [10]. Persson et al [5], para os Stellite® 6 e 21, verificaram este endurecimento, como mostrado na Figura 2-9.

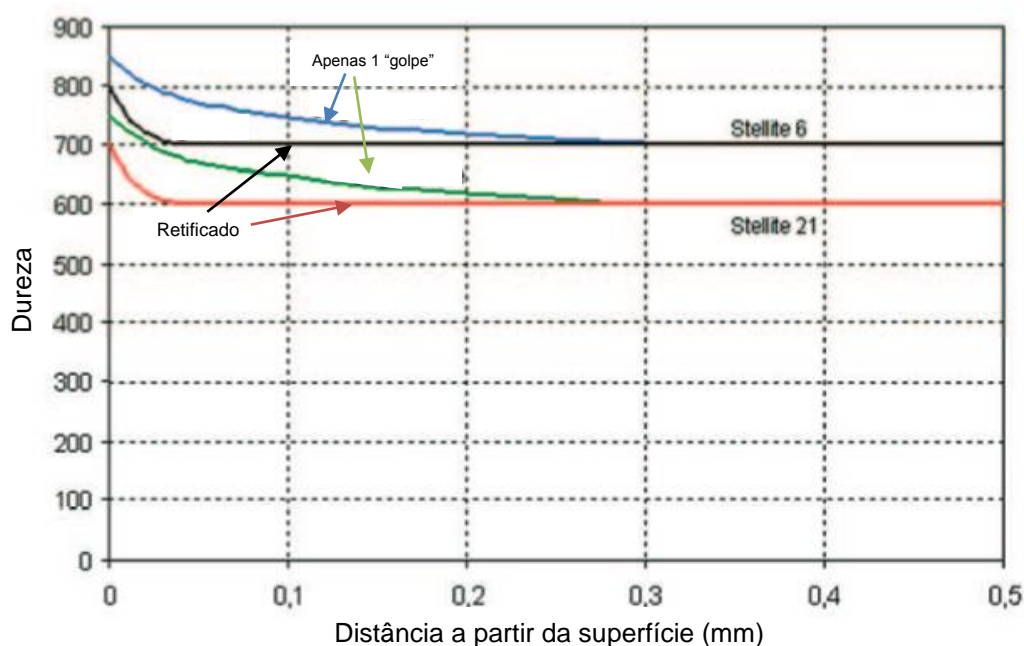


Figura 2-9 – Perfil de dureza abaixo da superfície de Stellites® 6 e 21 ($HV_{0,025}$). [5]

2.5.5. Influência dos óxidos

Um grande número de óxidos pode ser formado a partir do Fe, Cr e Co, sendo estes dois últimos componentes principais da maioria dos Stellite® [28,29]. Os filmes de óxidos são formados de uma combinação de vários óxidos, dependendo do efeito

combinado da pressão de contato com a velocidade de deslizamento. Os óxidos são resistentes e possuem boa adesão a matriz [29]. Para o Stellite® 6, uma maior concentração de Cr na camada de óxido foi encontrada, quando comparada ao substrato [30].

Segundo Persson et al [4], os óxidos não influenciaram na diminuição do atrito, como mostra a Figura 2-10. Um dos ensaios foi feito em atmosfera ambiente e o outro em argônio.

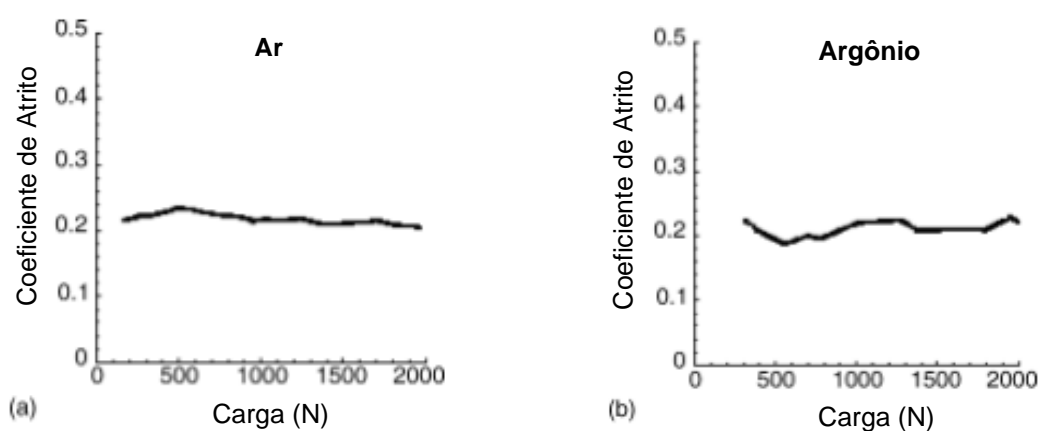


Figura 2-10 – Evolução do coeficiente de atrito com o aumento da carga em atmosfera de: (a) Ar e (b) Argônio. [4]

2.5.6. Sistema de baixo atrito

As investigações de Persson et al [4,5,6,7] levaram a conclusão de que existe um sistema de baixo atrito autorrenegerável nos Stellite® 6 e 21 para deslizamento em altas cargas (e altas pressões de contato). A Figura 2-11 mostra como seria esse sistema.

Esse sistema de baixo atrito é o responsável por manter o μ dos Stellite em níveis considerados baixos para o deslizamento de pares metálicos sem lubrificação, conforme mostra a Figura 2-12.

De maneira geral, esse sistema é composto de uma camada superficial muito fina, facilmente cisalhável, altamente orientada na direção do deslizamento (planos

HC {0001}). Esta orientação está ligada à transformação de fase (CFC-HC) pela qual o material é capaz de passar quando submetido a deformações mecânicas. Abaixo dessa camada, temos uma subcamada endurecida por deformação (encruada), capaz de suportar a carga normal.

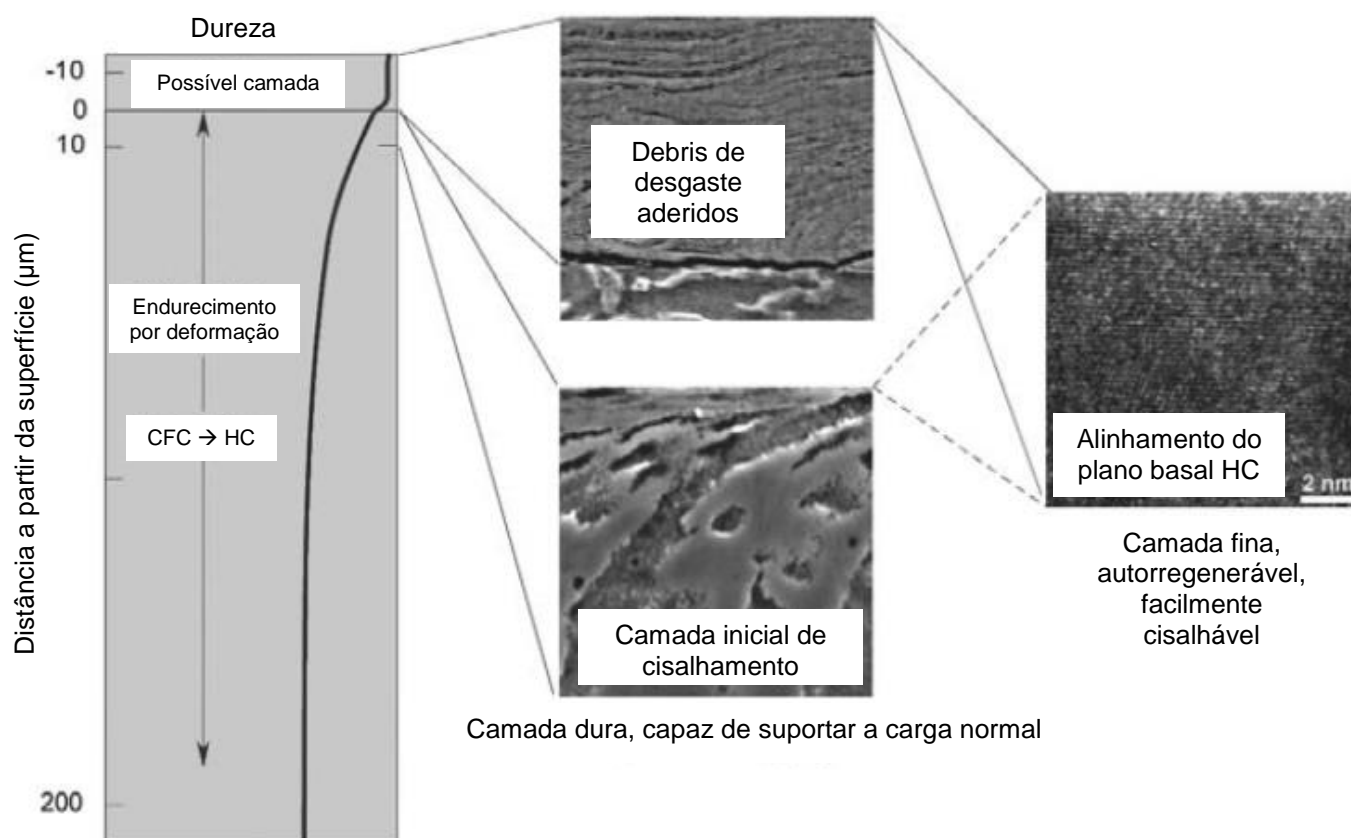


Figura 2-11 – Sistema autorregenerável de baixo atrito dos Stellites, típico de deslizamento em altas cargas. [5]

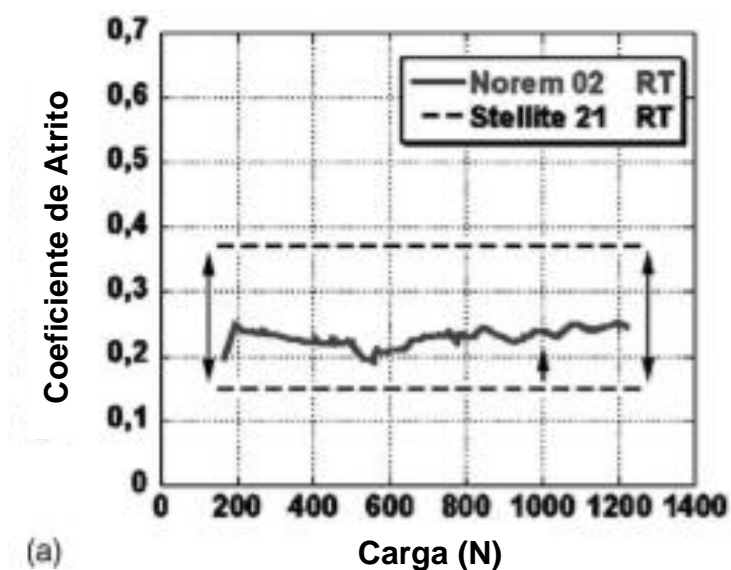


Figura 2-12 – Coeficiente de atrito em função da carga em temperatura ambiente. Neste gráfico também está representado a evolução do atrito para o NOREM 02 (composição Fe bal., 25,1% Cr, 4,13% Ni, 1,23% C, 3,23% Si, 4,4% Mn, 2,03% Mo e 0,18% N). [7]

2.5.7. Stellite® Alloy 250

Uma superliga de cobalto, comercialmente não usual, de utilização bastante específica é conhecida como Stellite® Alloy 250. A liga UmCO-50 (também chamada de Haynes 150 e Alloy 150) [22] possui basicamente a mesma composição, diferenciando-se pelo processo de fabricação; a Alloy 250 é fundida e a UmCO-50, forjada. Possui densidade 8,05 g/cm³ e temperatura de fusão de 1395 °C. Seu uso se dá principalmente em aplicações que exigem altas temperaturas, 650 a 1150 °C [24], como, por exemplo, lingoteiras, trilhos de fornos, grelhas para tratamentos térmicos, guias de portas de fornos a arco, etc [31]. Isso se deve a sua excepcional resistência ao choque térmico aliada a uma boa resistência ao desgaste.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentados os materiais e a metodologia utilizada no presente trabalho. De forma resumida, deslizou-se um pino de aço inoxidável supermartensítico 13Cr contra um disco da superliga de cobalto Stellite® Alloy 250 usando um tribômetro Plint TE67 na configuração pino-disco.

3.1. *Materiais*

Como o par tribológico possui materiais distintos, estes serão caracterizados separadamente.

3.1.1. *Pino*

O material utilizado como pino foi o aço inoxidável supermartensítico 13Cr, com a seguinte composição (Tabela 3-1), conforme fornecida pelo fabricante:

Elemento	% em peso
Cr	13
C	≤0,02
Ni	8
Mo	2
Fe	bal.

Tabela 3-1 – Composição química do pino conforme fornecida pelo fabricante.

O pino possui diâmetro de 7,95 mm e comprimento de 68 mm.

3.1.2. Disco

O material utilizado como disco foi a superliga de cobalto Stellite® Alloy 250, fundida. A composição fornecida pelo fabricante está na Tabela 3-2.

Elemento	% em peso
Co	49-52
Cr	27-29
Fe	22
Mo	0,3
Mn	0,3-1,0
W	0,1-0,8
C	0,05-0,15
Si	0,05-1,20
P	0,02

Tabela 3-2 – Composição química do disco conforme fornecida pelo fabricante.

O disco possui 75mm de diâmetro e 8mm de espessura.

3.2. Métodos

Para se proceder a investigação do comportamento tribológico do par deslizante em questão, adotou-se a seguinte metodologia.

3.2.1. Preparação das Amostras

Primeiramente, será descrita a preparação das amostras para os ensaios.

3.2.1.1. Limpeza

A limpeza foi feita utilizando-se um dispositivo de ultrassom, ficando os pinos e discos imersos, por 5 minutos, em acetona e em seguida em álcool absoluto.

3.2.1.2. Superfície

Os pinos foram recebidos com a superfície torneada. Para deixá-los nas mesmas condições iniciais de rugosidade, lixou-se todos os pinos com lixas #320, #500, #600 e #800. Isto foi feito para garantir o paralelismo. A Figura 3-1 mostra a superfície dos pinos como recebida e após o lixamento:

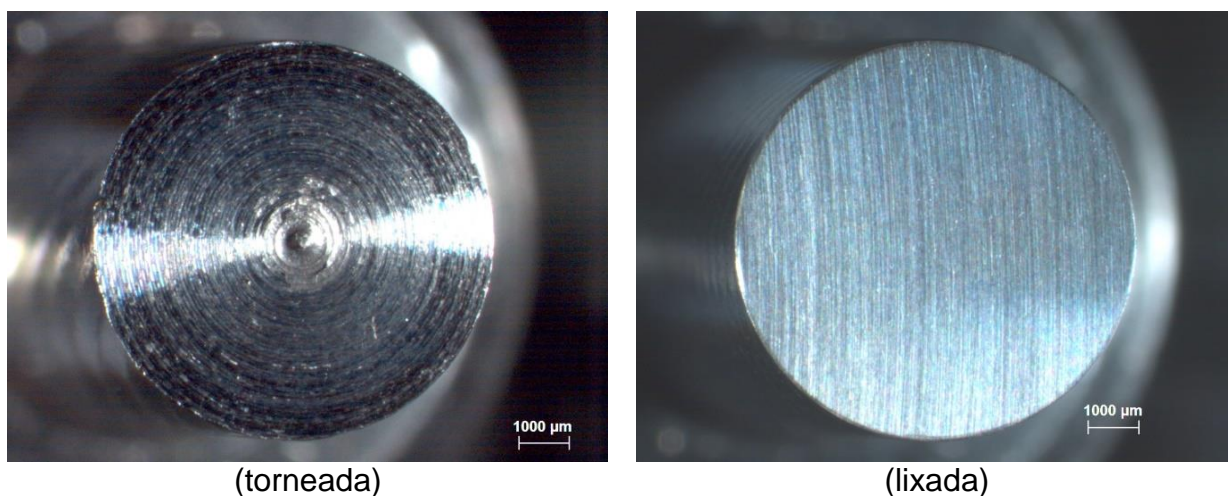


Figura 3-1 – Superfície do pino como recebido (torneada) e após o lixamento.

Já os disco foram recebidos com a superfície retificada, pronta para os ensaios (necessitando apenas da supracitada limpeza).

3.2.2. Configuração do Tribômetro

Os ensaios foram realizados no tribômetro PLINT TE67 do TRICORRMAT, na configuração pino-disco, sem lubrificação.

A velocidade utilizada na rotação dos discos foi de 136 rpm e o raio da trilha de desgaste de 28 mm, o que proporcionou uma velocidade de deslizamento de 0,4 m/s.

3.2.3. Relação de Cargas Utilizadas

Como o espectro de cargas utilizadas foi muito amplo, dois sistemas foram utilizados: peso morto e pneumático. Para até 100 N, utilizou-se o sistema de peso morto. Já para cargas acima de 100 N, utilizou-se o sistema pneumático. As cargas utilizadas foram:

Carga (N)	5	18,7	62,9	110	220	350	400	450	500
Pressão de contato nominal (MPa)	0,101	0,377	1,267	2,216	4,432	7,051	8,058	9,065	10,073
Nº de ensaios	2	2	2	2	2	4	5	3	2

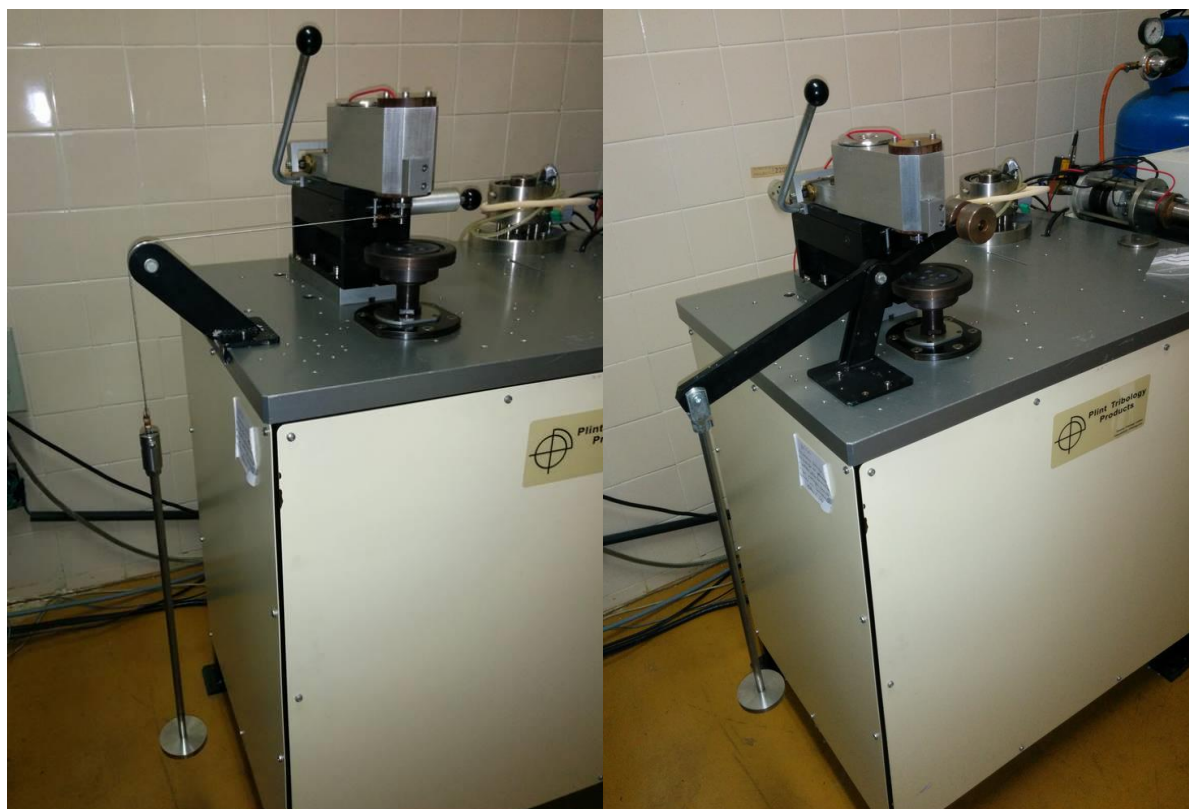
Tabela 3-3 – Relação das cargas normais utilizadas e as respectivas pressões de contato nominal.

3.2.4. Avaliação da força de atrito

O tribômetro utiliza células de carga, o que permite o cálculo da força de atrito de forma simultânea ao ensaio. Com a força tangencial aferida por uma dessas células, mais a carga normal (dado de entrada), a central de monitoramento do tribômetro fornece o valor do coeficiente de atrito (razão entre a força de atrito e a carga normal).

3.2.5. Calibração do tribômetro PLINT TE67

Para a aferição das células de carga, utilizou-se todas as regras do manual do tribômetro PLINT TE67 [32]. Assim, utilizou-se cargas de peso-morto previamente conhecido e os dispositivos próprios da máquina (FIGURA 3-2).



Dispositivo de aferição da célula de carga tangencial

Dispositivo de aferição da célula de carga normal

Figura 3-2 – Dispositivos utilizados para a aferição das células de carga.

3.2.6. Duração e Condições Ambientais

O tempo padrão de realização dos ensaios foi de 60 minutos, sendo menor apenas naqueles onde houve travamento permanente do par corpo (disco) e contra-corpo (pino).

Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente (23 ± 2 °C).

3.2.7. Volume de Desgaste

Para calcular o volume de desgaste dos discos, utilizou-se o analisador tridimensional de superfícies Talysurf CLI 1000 da Taylor Hobson. Com este equipamento, traçou-se 4 perfis superficiais. Destes perfis, como o da Figura 3-5, foi possível obter a área dos vales e picos. De posse destas, foi possível integrar estas

áreas e picos pelo comprimento da trilha de desgaste e obter o volume de desgaste e do coeficiente de desgaste dimensional.

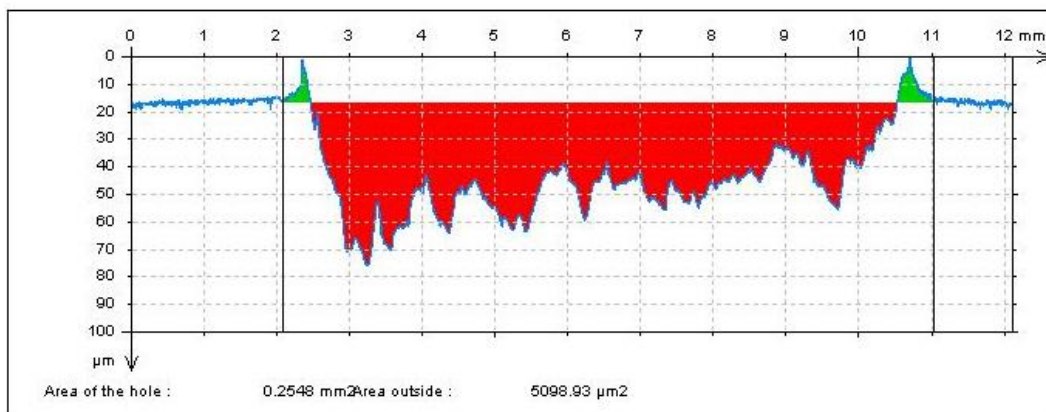


Figura 3-3 – Perfil representativo da região da trilha de desgaste, utilizado para calcular o volume de desgaste e coeficiente dimensional de desgaste.

3.2.8. Caracterização das Amostras

As superfícies das amostras foram caracterizadas antes e depois dos ensaios, utilizando as ferramentas relacionadas a seguir.

A dureza foi medida com um microdurômetro PANTEC.

A rugosidade superficial foi quantificada por um analisador tridimensional de superfície (Talysurf CLI 1000, Taylor Hobson Precision), utilizando o sistema por contato.

Tanto os pinos quanto os discos também foram investigados através do microscópio estereoscópico Carl Zeiss e do microscópio eletrônico de varredura (MEV EVO 40XVP, Zeiss), ambos do LCSM (Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais). Além desses, utilizou-se também o microscópio óptico Nikon ECLIPSE MA200 do Tricormat.

Para a difração de raios-X, utilizou-se um difratômetro da marca Rigaku, na geometria Bragg-Brentano radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5419$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios foram programados de tal maneira que conseguisse se investigar o comportamento do atrito e do desgaste da superliga de cobalto Alloy 250 para uma ampla faixa de cargas. Primeiramente, será apresentada a caracterização dos materiais utilizados. Em seguida, um relato pormenorizado dos ensaios, mostrando a “evolução” do tribossistema e apresentando dados como curvas de atrito, rugosidade, volume de desgaste e fotos das trilhas de contato.

4.1. *Caracterização dos materiais*

Aqui, será apresentada a caracterização dos materiais utilizados nesse trabalho.

4.1.1. *Pino*

A microestrutura do pino, após ataque por reagente Vilella, de 30s a 1 minuto, exibe uma estrutura composta de martensita revenida, conforme mostrado pela Figura 4-1.

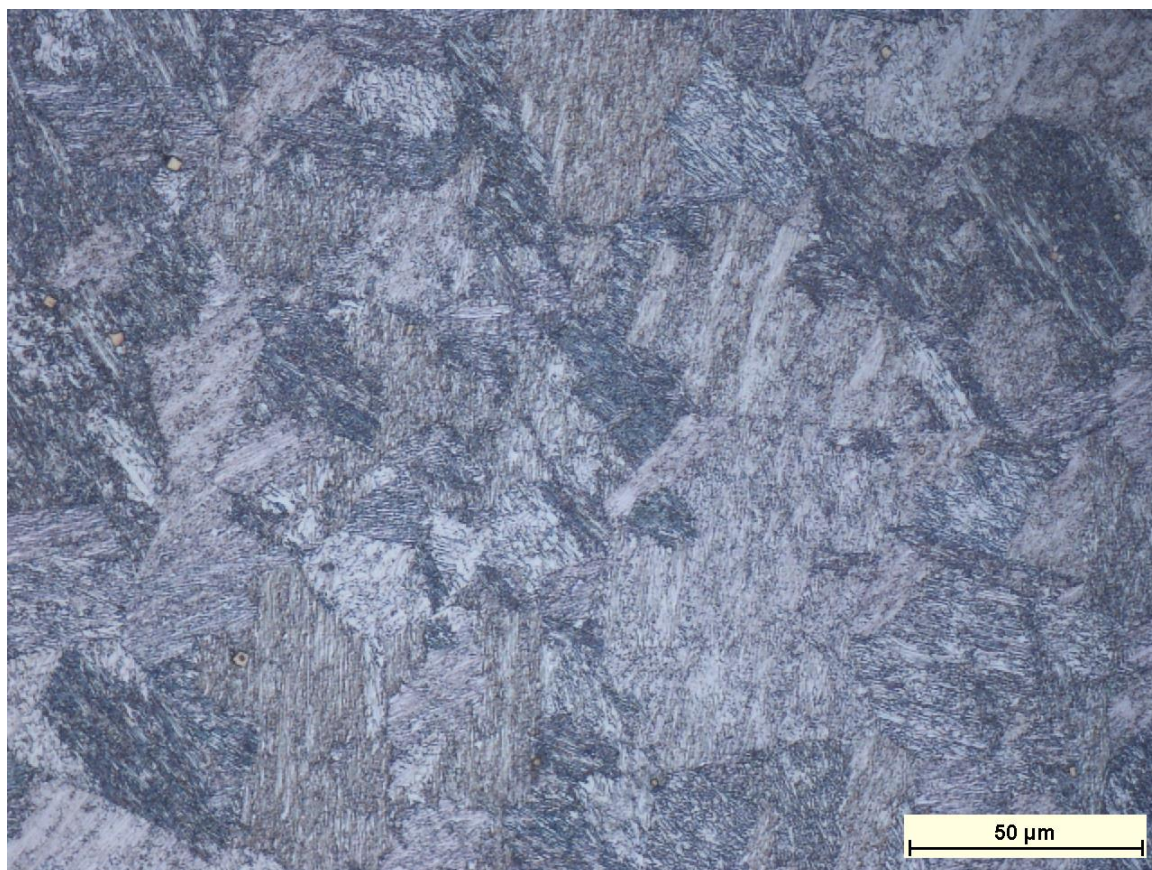


Figura 4-1 – Microestruturado pino.

A dureza medida do pino foi de HV 320.

4.1.2. Disco

O disco utilizado, conforme visto nas Figuras 4-2 e 4-3, após ataque com HCl, apresenta uma estrutura grosseira, típica de ligas fundidas, com uma microestrutura composta de uma matriz austenítica de solução sólida de Co-Cr-Fe com uma pequena fração volumétrica de carbonetos M_7C_3 .

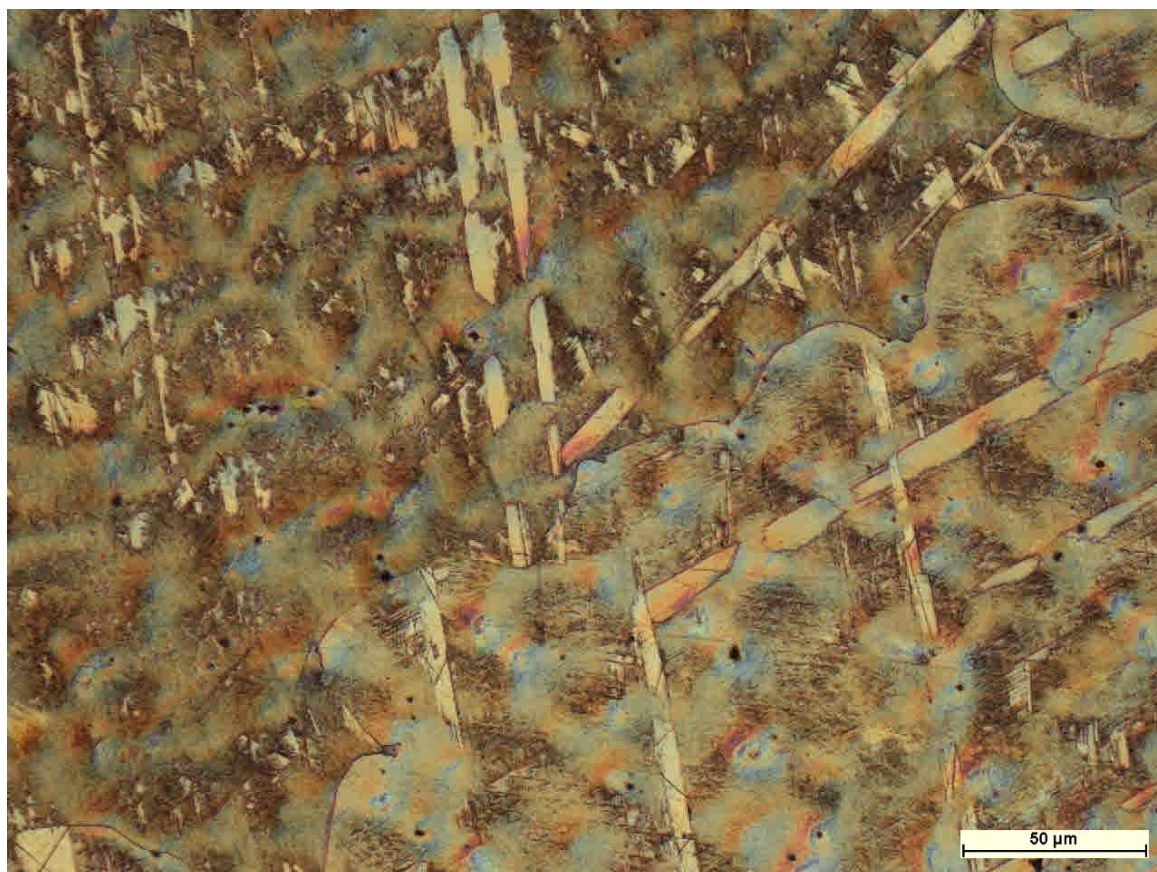


Figura 4-2 – Microestrutura do disco.

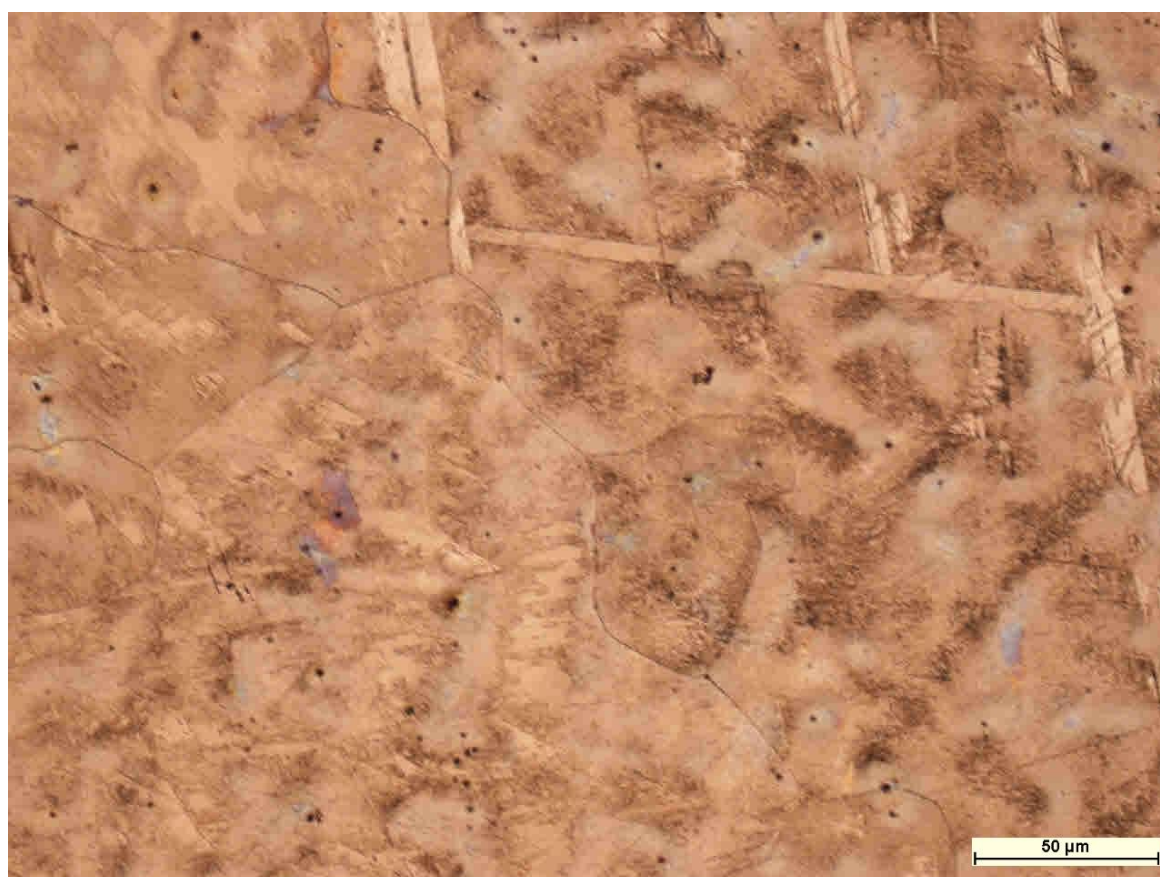


Figura 4-3 – Uma outra visão da microestrutura do disco.

Os valores medidos para a dureza foram de HV 234.

4.2. Descrição dos ensaios e discussão

A primeira carga utilizada foi 5 N. O atrito se manteve “estável”, isto é, sem nenhuma transição, nem mudança brusca de patamar, conforme mostra a Figura 4-4.

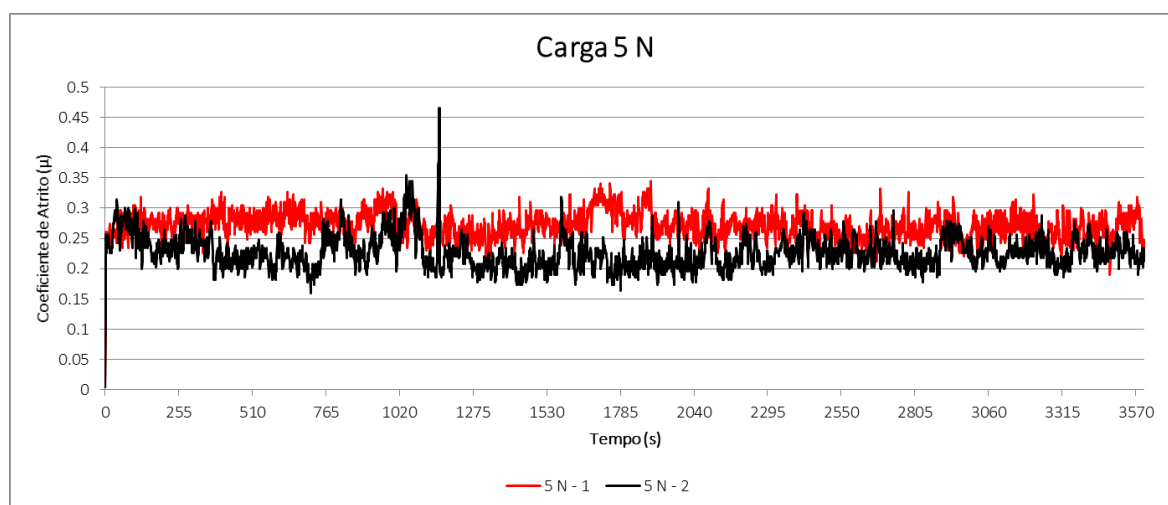


Figura 4-4 – Coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio utilizando 5 N de carga normal.

O progressivo aumento da carga normal para os valores de 18,7, 62,9, 110 e 220 N não provocou grandes mudanças no atrito (no que tange transições no comportamento), alterando apenas seu valor médio, como mostram as Figuras 4-5 a 4-8.

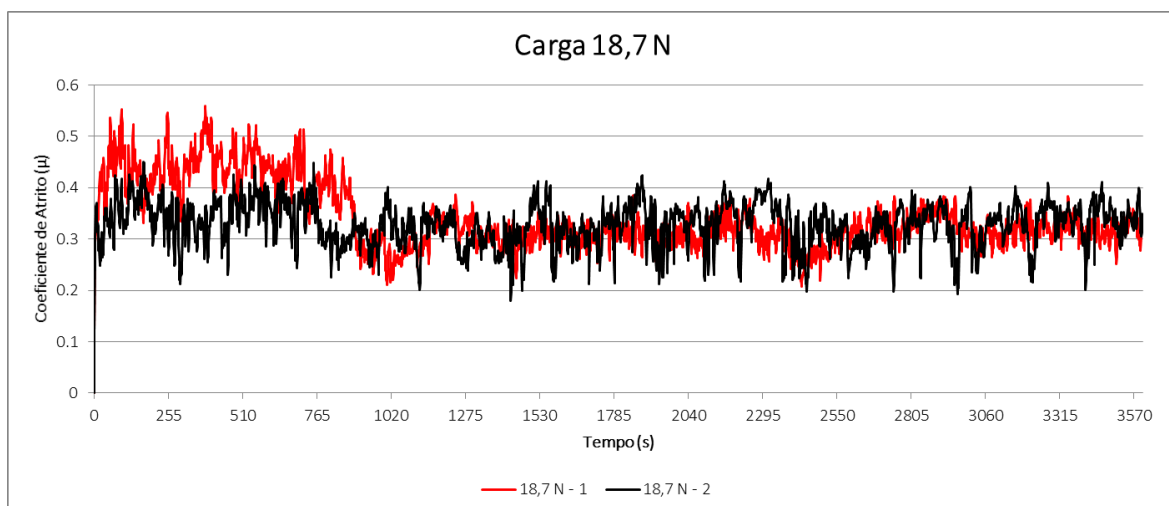


Figura 4-5 – Coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio utilizando 18,7 N de carga normal.

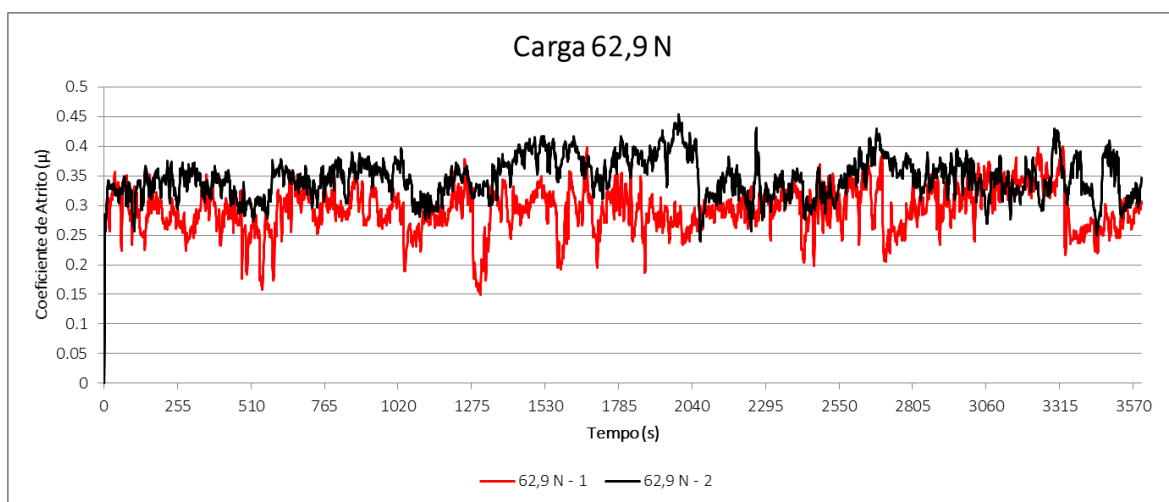


Figura 4-6 – Coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio utilizando 62,9 N de carga normal.

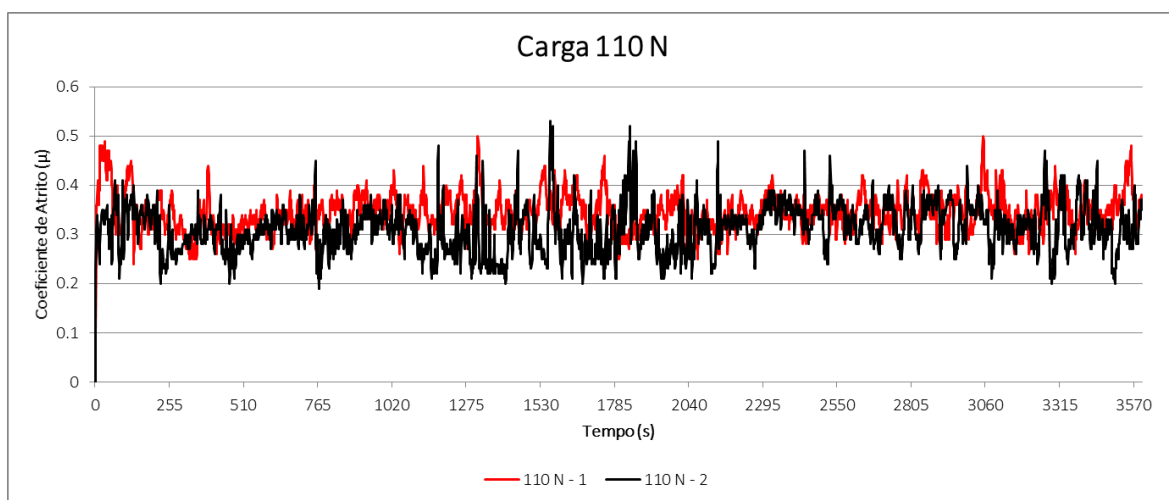


Figura 4-7 – Coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio utilizando 110 N de carga normal.

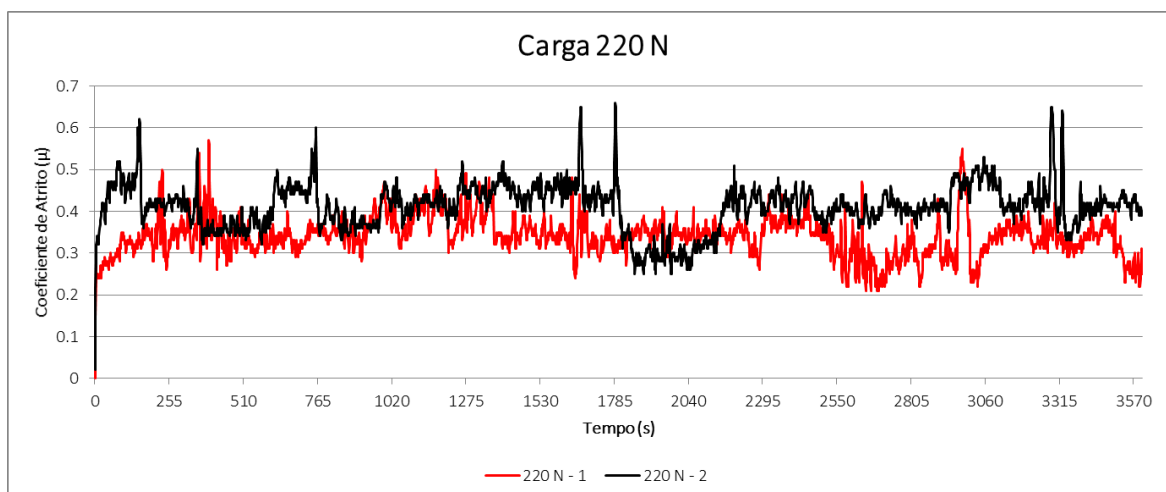


Figura 4-8 – Coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio utilizando 220 N de carga normal.

Apesar dos valores de μ possuírem valores médios diferentes, o comportamento “estável” (sem transições) foi o mesmo. Isto possibilitou uma comparação entre os seus valores médios e a carga normal aplicada, conforme mostra a Figura 4-9, que mostrou um aumento desses com o aumento dessa carga.

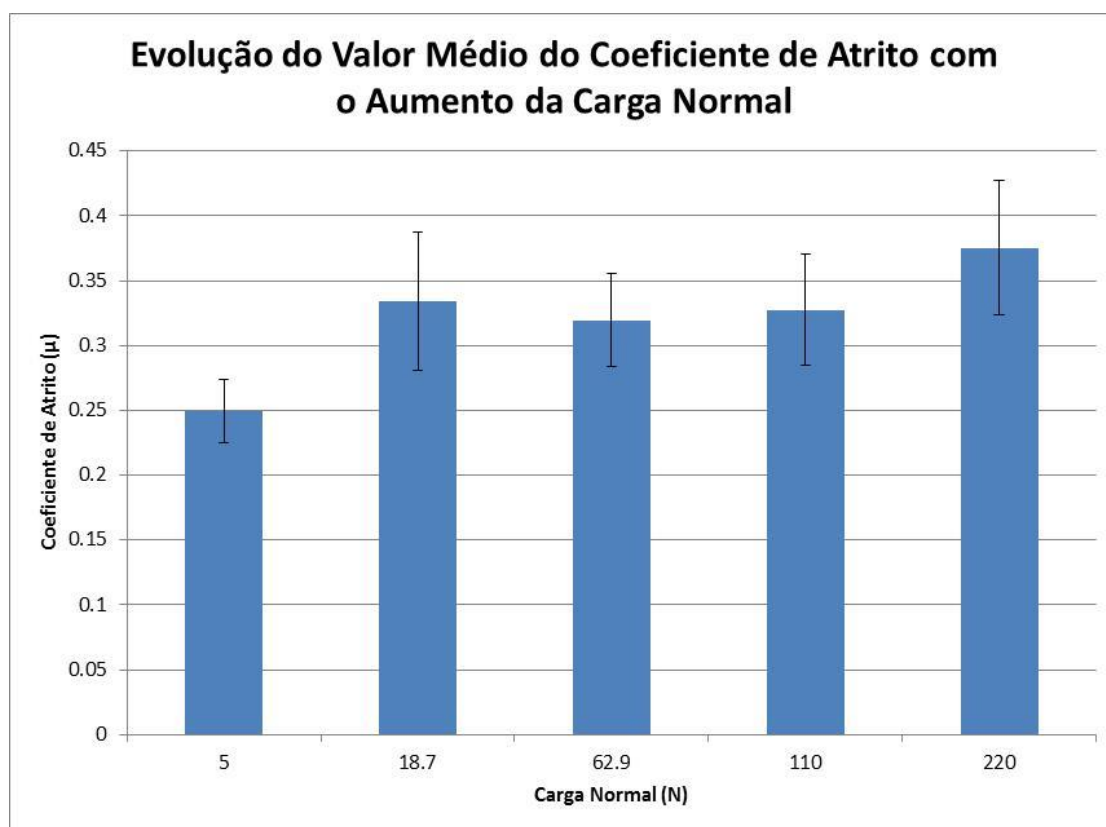


Figura 4-9 – Evolução do valor médio do atrito com o aumento da carga.

Vale notar que estes valores estão no mesmo patamar do encontrado na literatura [4, 7] para o Stellite® 21, mostrados nas Figuras 2-10 e 2-12.

Da mesma forma que o coeficiente de atrito médio aumentou com o aumento da carga normal, o volume total de desgaste teve o mesmo comportamento, exibido na Figura 4-10.

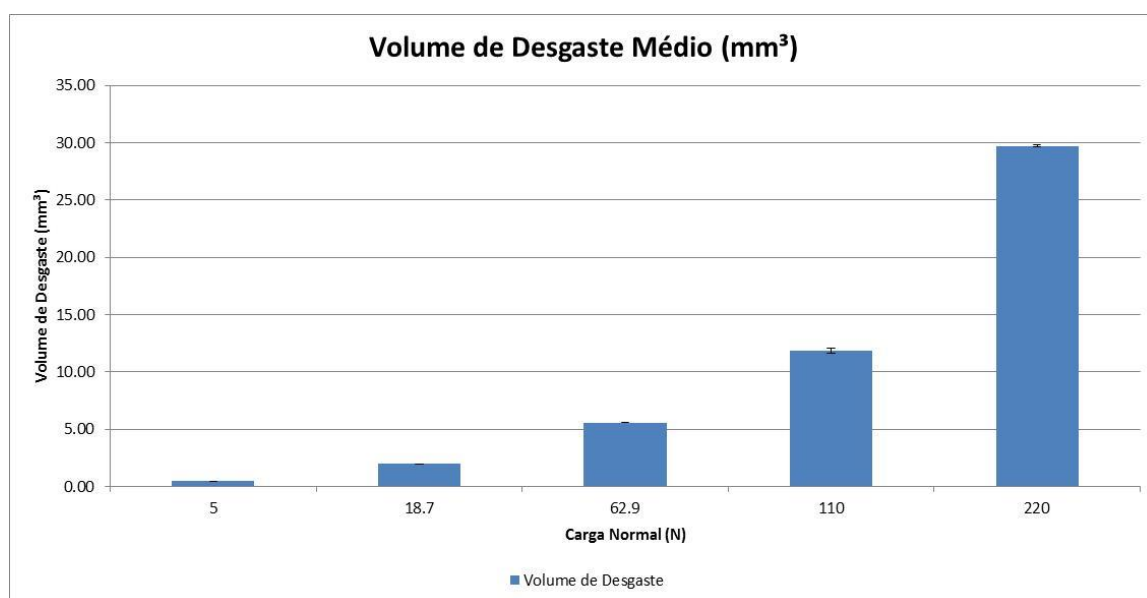


Figura 4-10 – Volume de desgaste em função da carga normal para ensaios com carga entre 5 e 220 N.

Com o aumento da carga, as trilhas de desgastes passaram a ficar maiores e a rugosidade se modificou intensamente. As Figuras 4-11 e 4-12 mostram o desenvolvimento da trilha de desgaste do ensaio utilizando 5 N de carga normal para o ensaio utilizando 220 N (deve-se tomar atenção na visualização das escalas).

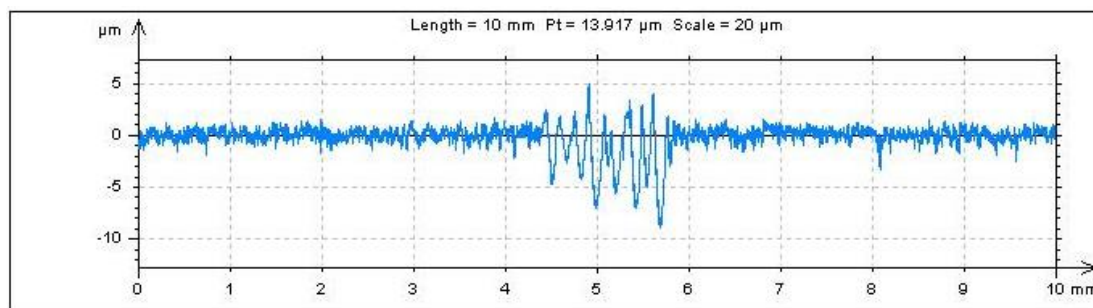


Figura 4-11 – Perfil topográfico mostrando a trilha de desgaste para 5 N de carga normal.

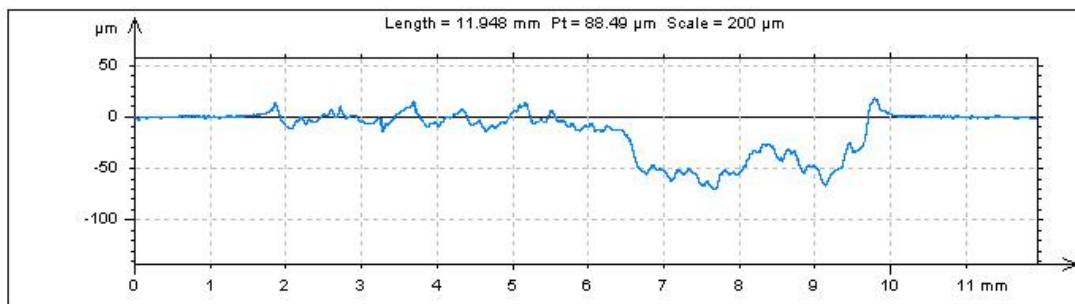


Figura 4-12 – Perfil topográfico mostrando a trilha de desgaste para 220 N de carga normal.

As Figuras 4-13 e 4-14, obtidas com o auxílio do microscópio estereoscópio, também mostram esse desenvolvimento da trilha de desgaste (de 5 N de carga normal para 220 N).

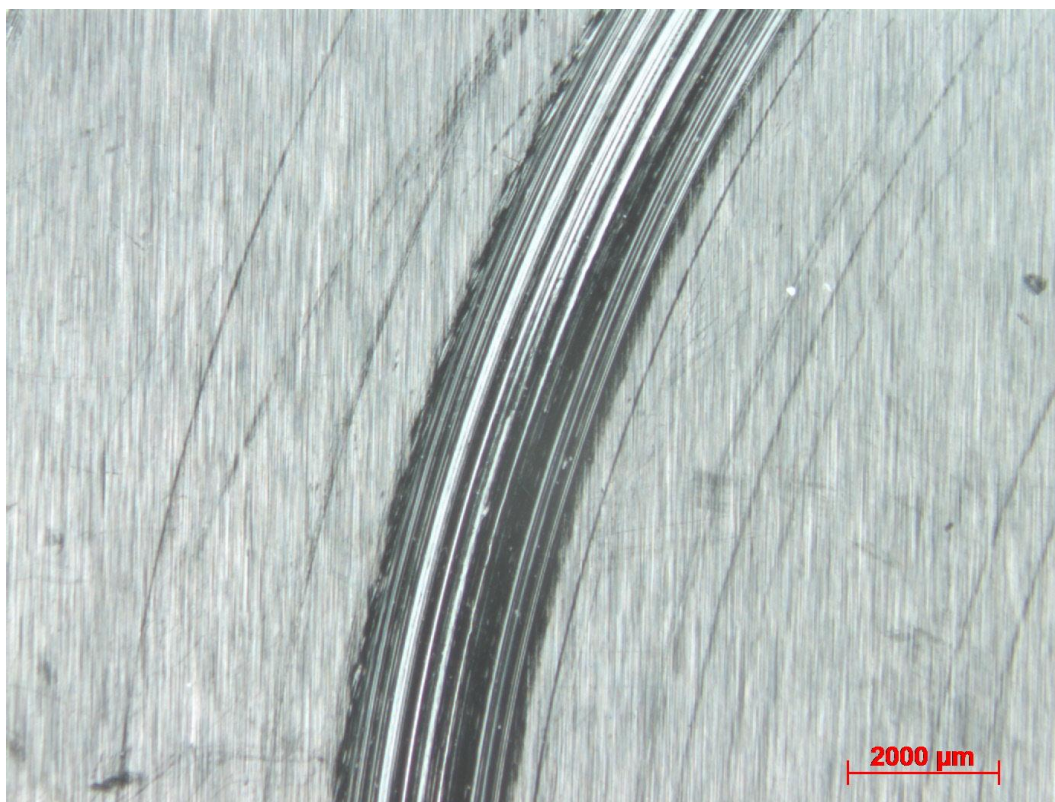


Figura 4-13 – Trilha de desgaste para a carga normal de 5 N.

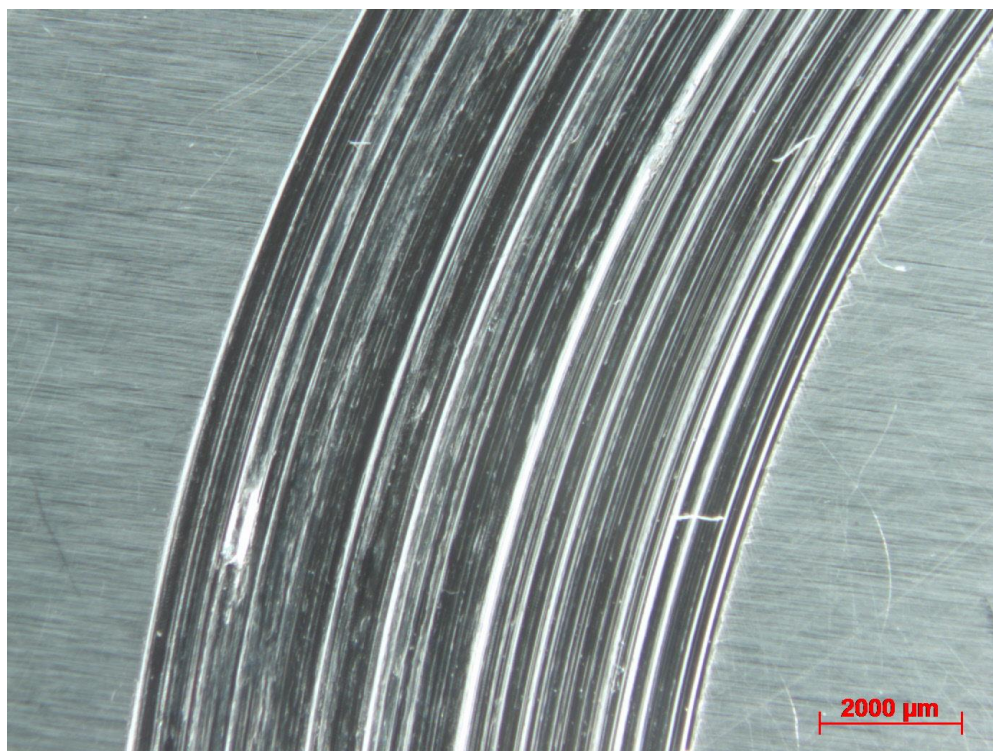


Figura 4-14 – Trilha de desgaste para a carga normal de 220 N.

Utilizando o MEV, foi possível obter a Figura 4-15, que mostra grandes sulcos plásticos e deposição de material no disco durante o ensaio a 220 N de carga normal.

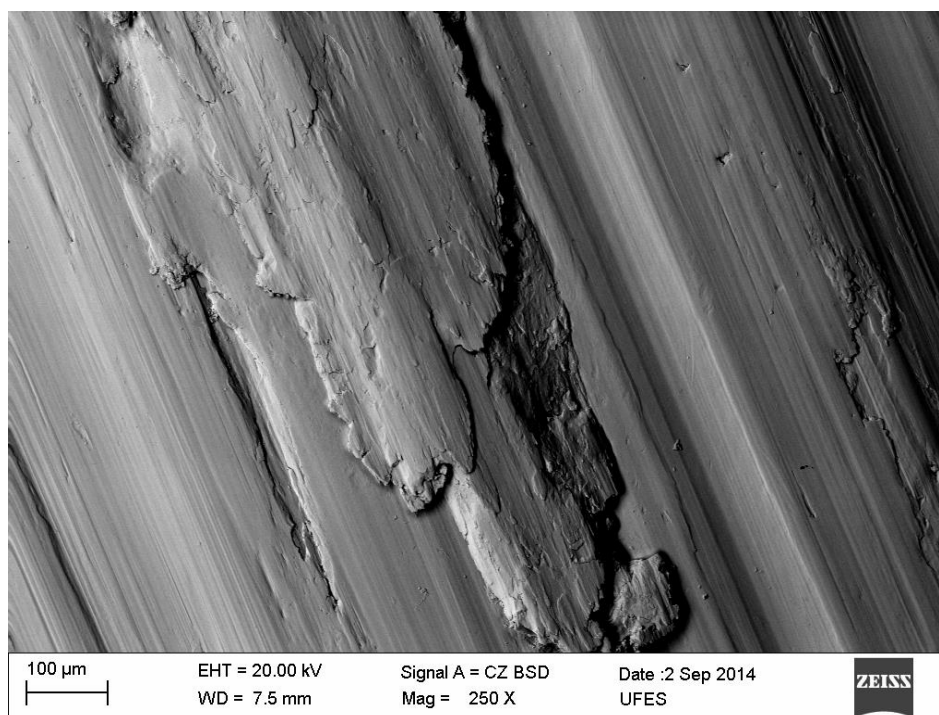


Figura 4-15 – Sulcos plásticos e deposição de material na trilha de desgaste (220 N de carga normal).

Continuando o aumento da carga normal, o comportamento do tribosistema sofre uma grande mudança. A partir de 350 N, foi possível a obtenção de um coeficiente de atrito muito baixo, com μ da ordem de 10^{-2} a 10^{-3} , conforme mostrado na Figura 4-16. Nos resultados em que esse coeficiente de atrito muito baixo foi obtido, ocorreu uma sequência de eventos físicos, melhor descritos na seção 4.2.1. Foi possível reproduzir o fenômeno de baixo atrito em 3 dos 4 ensaios.

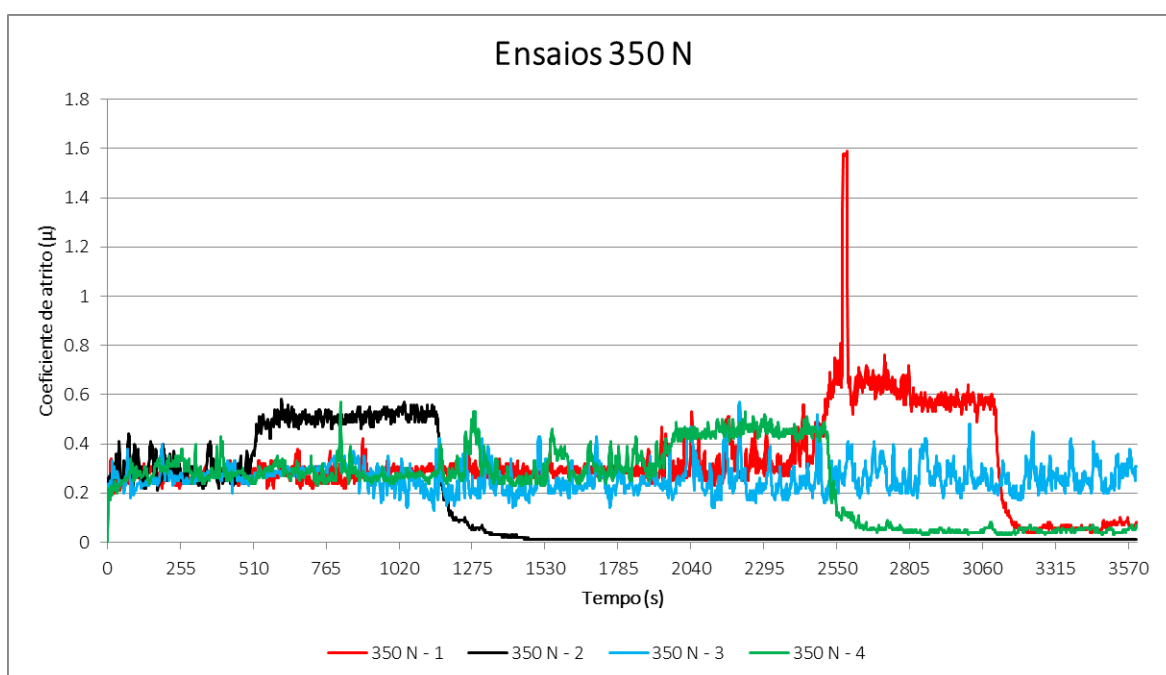


Figura 4-16 – Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio com 350 N de carga normal.

Não apenas o atrito, mas o desgaste também diminuiu, conforme será mostrado na Figura 4-37. A trilha de desgaste permaneceu aumentando, Figuras 4-17 e 4-18, e os debris foram aderindo às bordas dos pinos, Figura 4-19.

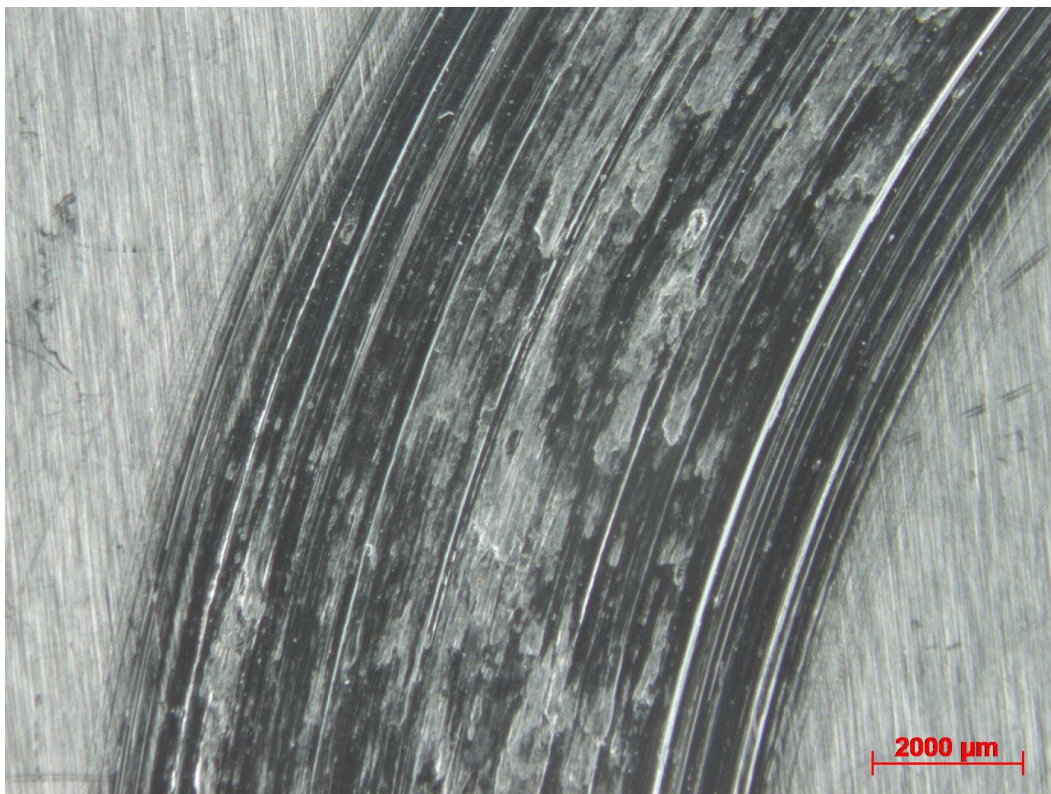


Figura 4-17 – Trilha de desgaste para a carga normal de 350 N.

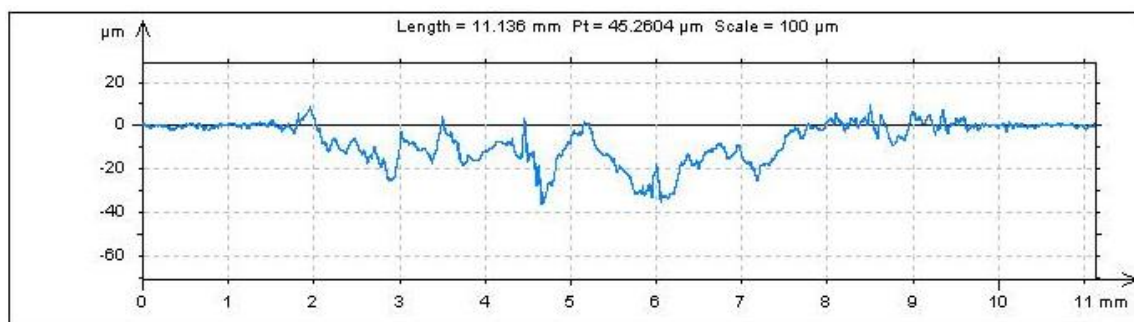


Figura 4-18 – Perfil topográfico mostrando a trilha de desgaste para 350 N de carga normal.

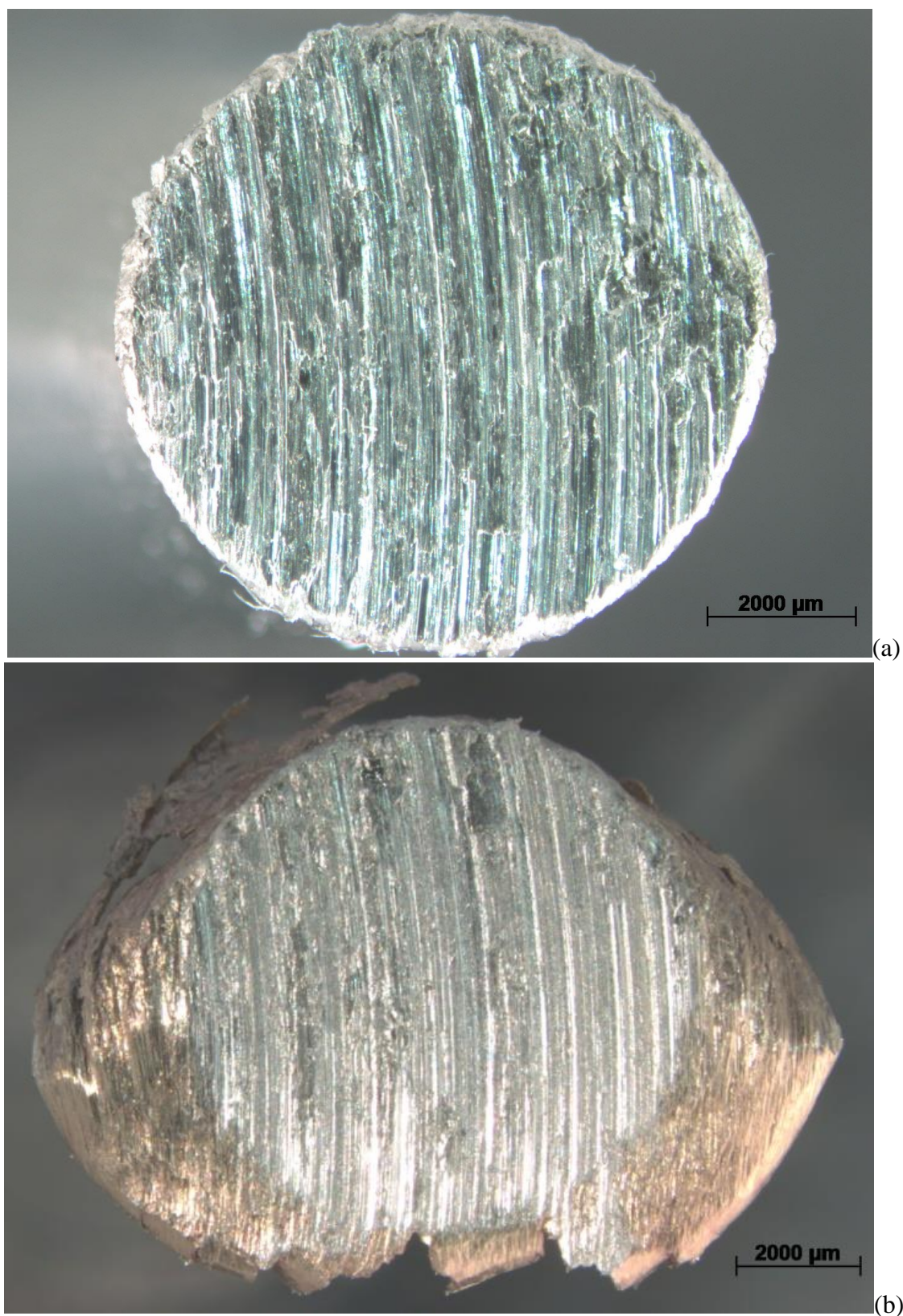


Figura 4-19 – Pinos utilizados em ensaios com carga normal de 350 N – (a) ensaio sem resultado de baixo atrito (b) ensaio tendo como resultado um baixo atrito.

A Figura 4-20 mostra a análise EDS de uma região da trilha de desgaste de um disco. Nas regiões 3, 5 e 6 a trilha apresentou composição muito próxima a nominal da liga Alloy® 250. Já nas regiões 1, 2 e 4 verificou-se depósitos, com grande presença de Fe (chegando a 39,463% em peso). Este é um grande indicativo de que houve transferência de material do pino para o disco.

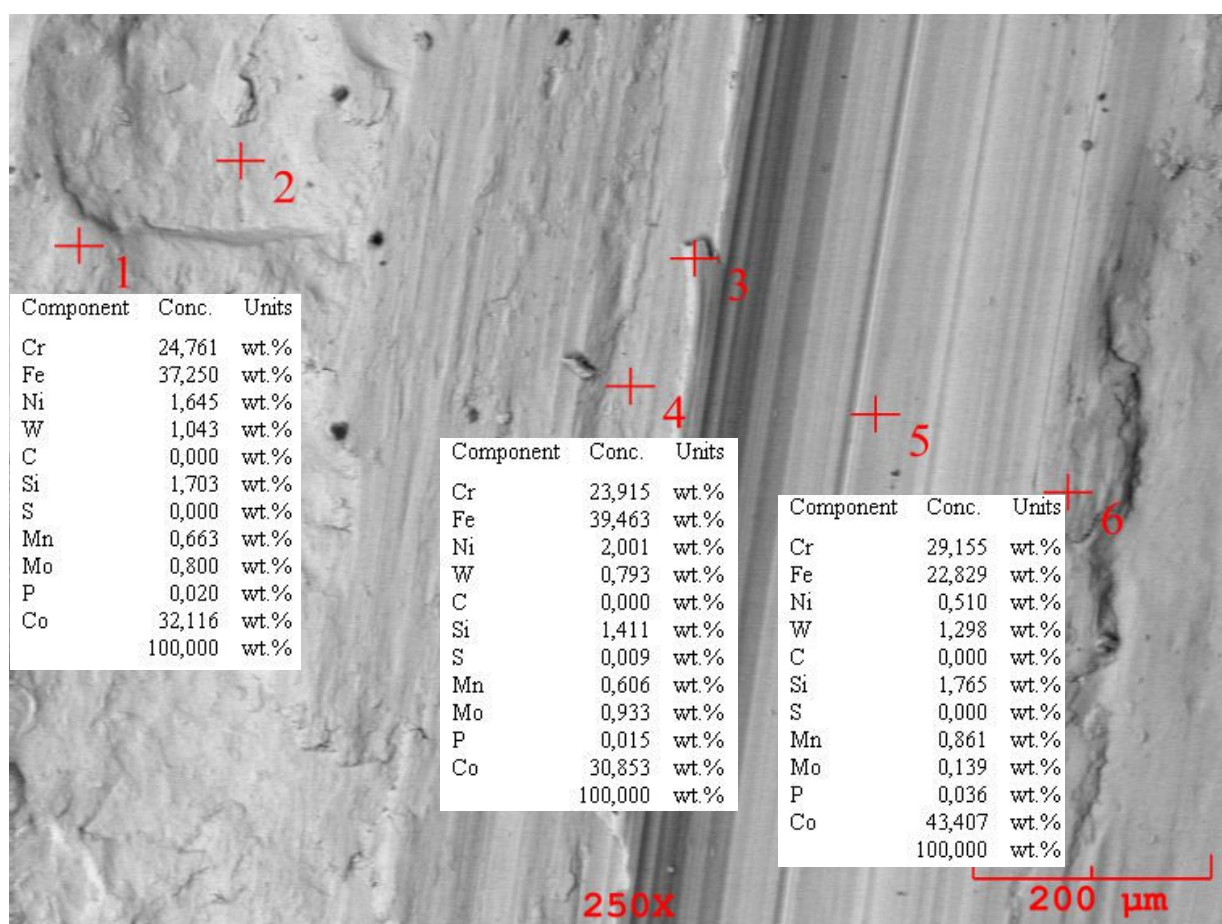


Figura 4-20 – Análise EDS da trilha de desgaste para um ensaio utilizando carga normal de 350 N. Composições apenas das regiões 1, 4, 5 e 6.

Nos cinco ensaios com 400 N de carga normal, obteve-se o baixo atrito em três deles, conforme Figura 4-21. Dos dois que não apresentaram um baixo atrito, um não apresentou nada em comum com os outros resultados (identificado na Figura

4-21 como 400 N – 3). No outro (identificado na Figura 4-21 como 400 N – 2), tinha-se a sensação (baseada nas evidências macroscópicas: aumento do ruído sonoro, do patamar do atrito e do tamanho dos debris) da reprodução do fenômeno que levava ao baixo atrito. Porém ocorreu um travamento que impossibilitou a continuação do deslizamento e, portanto, do ensaio.

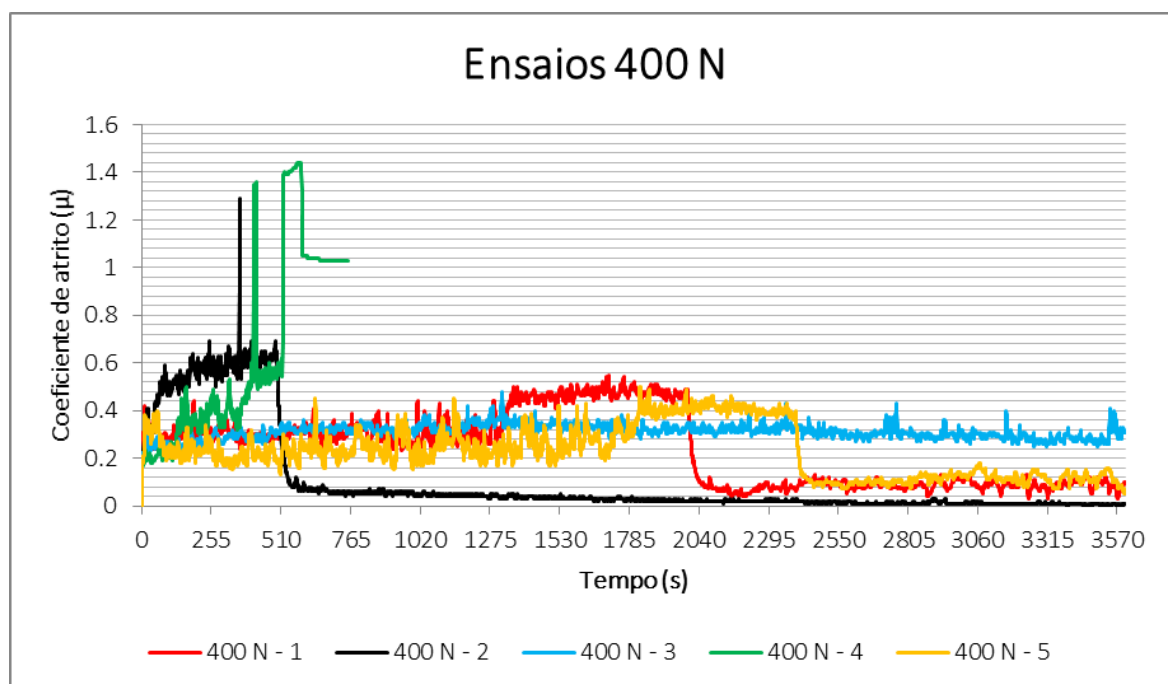


Figura 4-21 – Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio com 400 N de carga normal.

As Figura 4-22 (representando o ensaio 400 N – 2, no qual rapidamente se obteve o fenômeno do baixo atrito) e 4-23 (representando o ensaio 400 N – 5, no qual o fenômeno só foi observado na parte final do ensaio) mostram o aspecto visual da trilha de desgaste para a carga normal de 400 N, com a presença do fenômeno de baixo atrito. Já a Figura 4-24, mostra um caso, nas mesmas condições de ensaio, onde não se obteve o baixo atrito. O que fica patente da observação dessas três figuras é que, nos ensaios onde se observou o fenômeno do baixo atrito, também se observou grandes depósitos de material (transferência do pino para o disco) na trilha de desgaste.

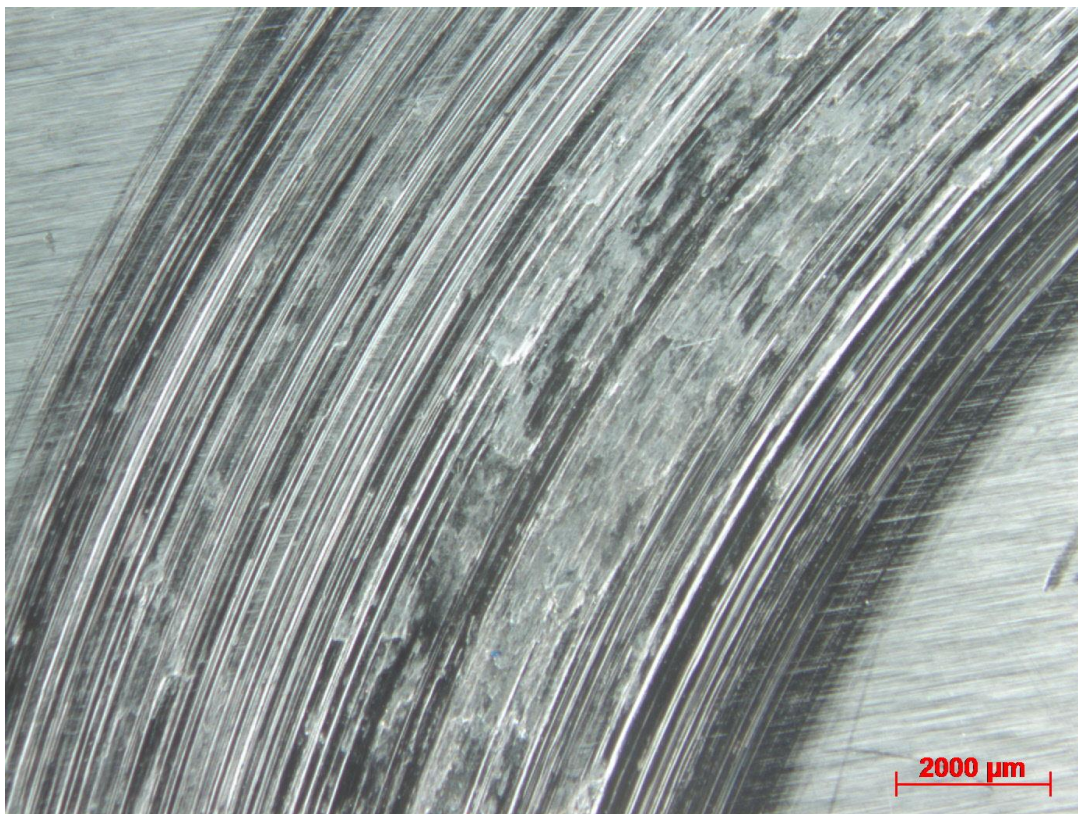


Figura 4-22 – Trilha de desgaste para a carga normal de 400 N – com baixo atrito.

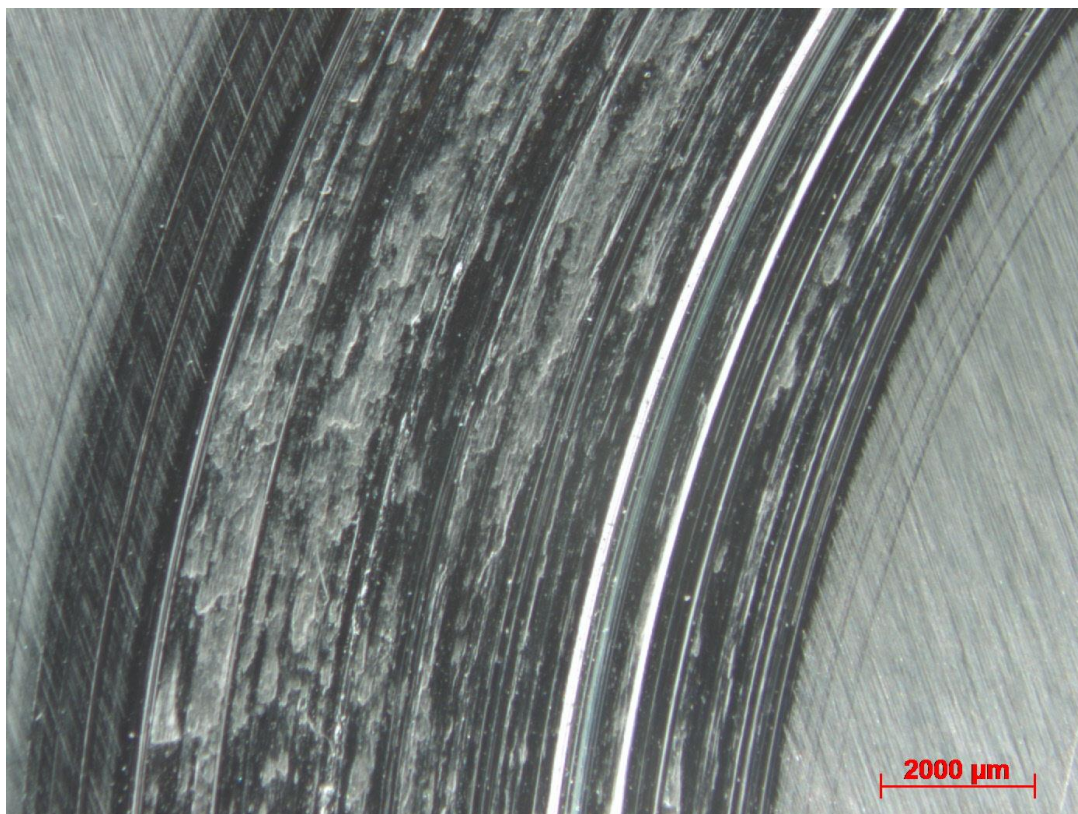


Figura 4-23 – Trilha de desgaste para a carga normal de 400 N – com baixo.

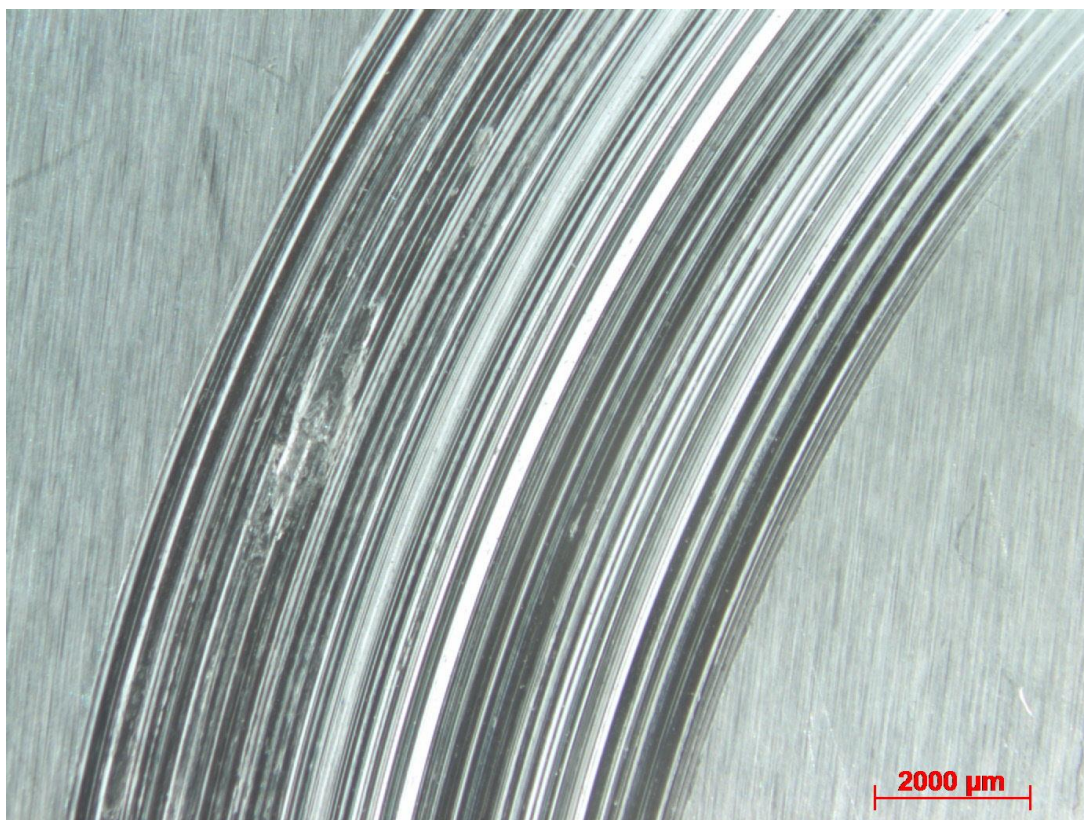


Figura 4-24 – Trilha de desgaste para a carga normal de 400 N – sem baixo atrito.

A Figura 4-25 mostra o perfil topográfico do disco para o ensaio com 400 N de carga normal.



Figura 4-25 – Perfil topográfico mostrando a trilha de desgaste para 400 N de carga normal.

Todos os 3 ensaios realizados com 450 N de carga apresentaram o fenômeno do baixo atrito, como mostrado na figura Figura 4-26.

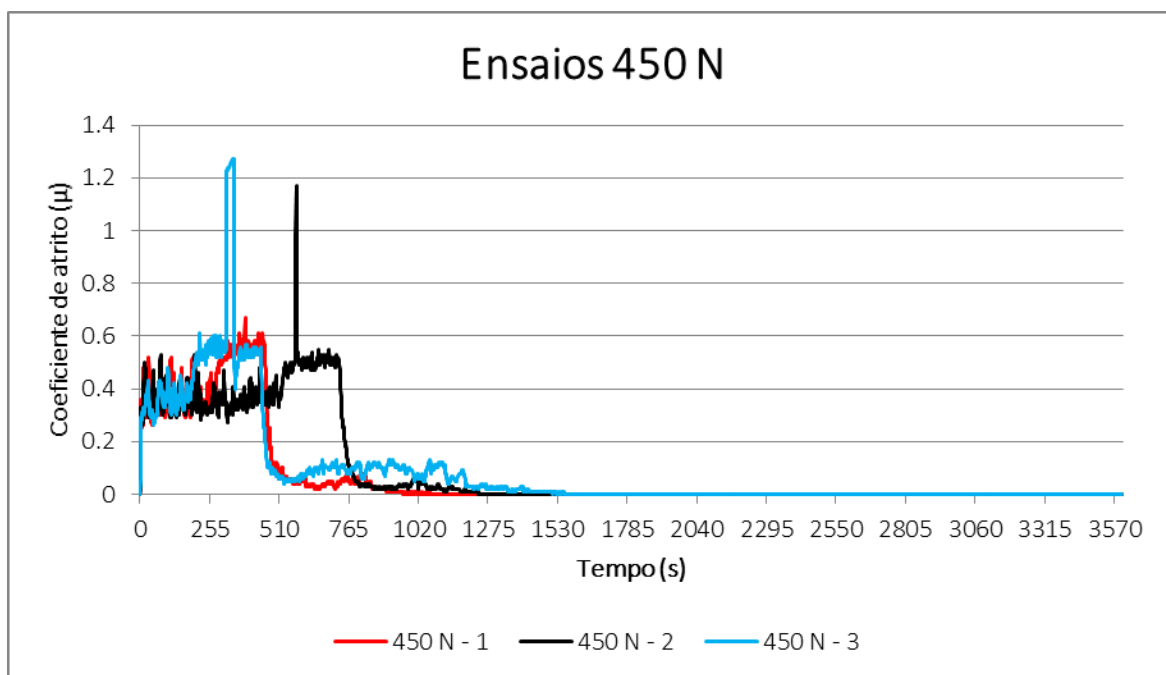


Figura 4-26 – Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio com 450 N de carga normal.

A Figura 4-27 mostra o aspecto visual da trilha de desgaste para o ensaio utilizando carga normal de 450 N, com grandes depósitos de material, enquanto a Figura 4-28 mostra o perfil topográfico para este mesmo ensaio.

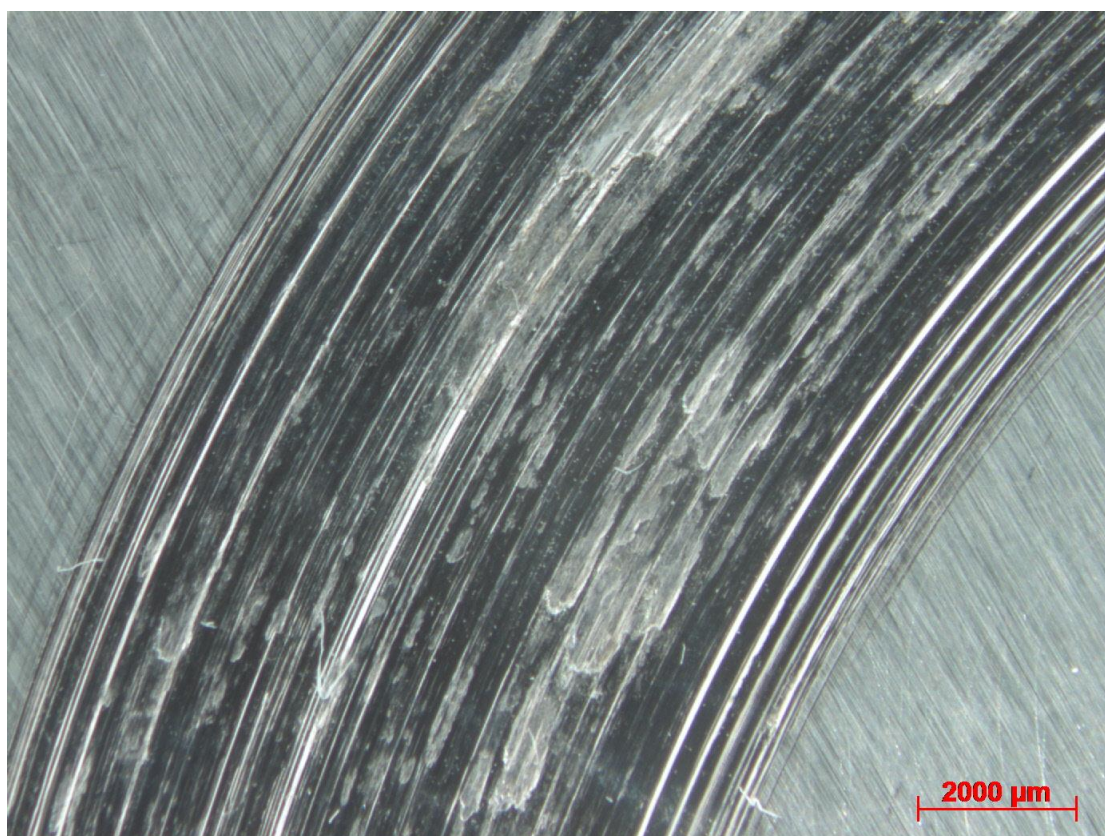


Figura 4-27 – Trilha de desgaste para a carga normal de 450 N.

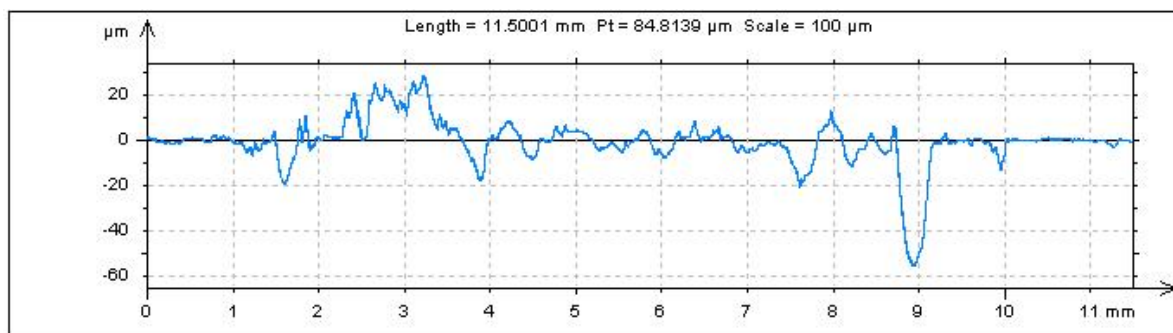


Figura 4-28 – Perfil topográfico mostrando a trilha de desgaste para 450 N de carga normal.

A Figura 4-29 mostra a análise EDS de uma região da trilha de desgaste de um disco. A partir dela, é possível verificar a grande diferença de composição entre as regiões 1 e 2. Na região 2, a composição do disco possui valores similares aos fornecidos pelo fabricante (Tabela 3-2). Na região 1 existe presença de grande depósito de material, com composição muito semelhante à do pino. Credita-se essa grande diferença de composição à transferência de material do pino para o disco.

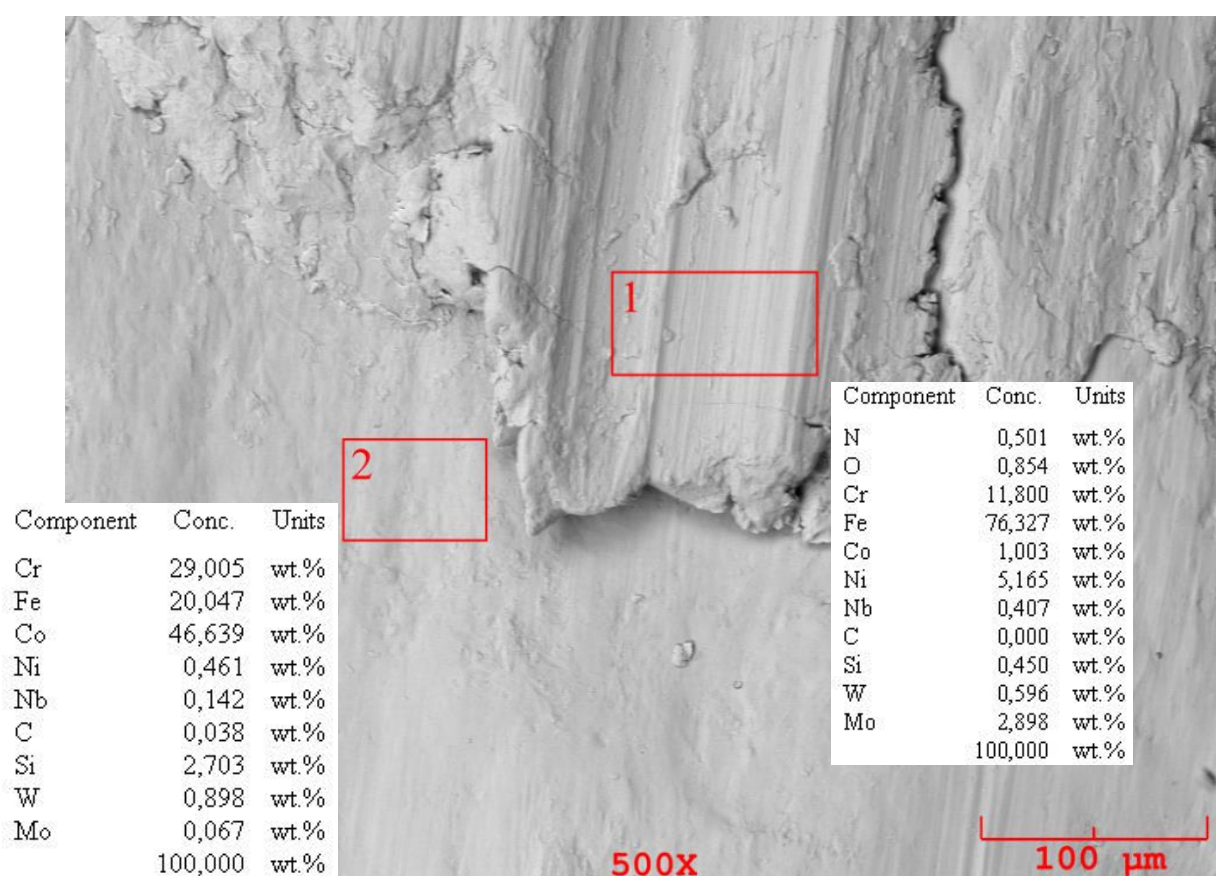


Figura 4-29 – Análise EDS da trilha de desgaste para um ensaio utilizando carga normal de 450 N.

Para os ensaios utilizando carga de 450 N, os três pinos apresentaram aspecto muito parecidos, com material aderido a borda, conforme mostrado nas Figuras 4-30 e 4-31. Acredita-se que este material aderido seja debris (disco) compactado que permaneceu no contato e uniu-se as bordas do pino. A Figura 4-40 mostra grande adesão de desbris ao pino.

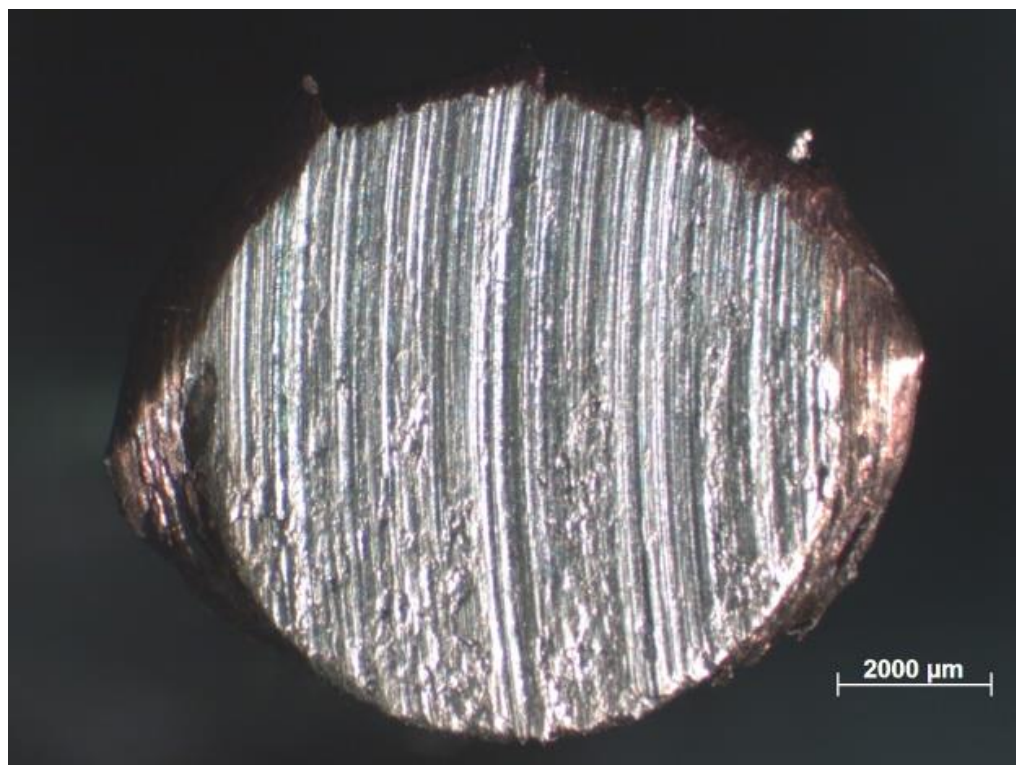


Figura 4-30 – Pino após ensaio utilizando carga normal de 450 N.

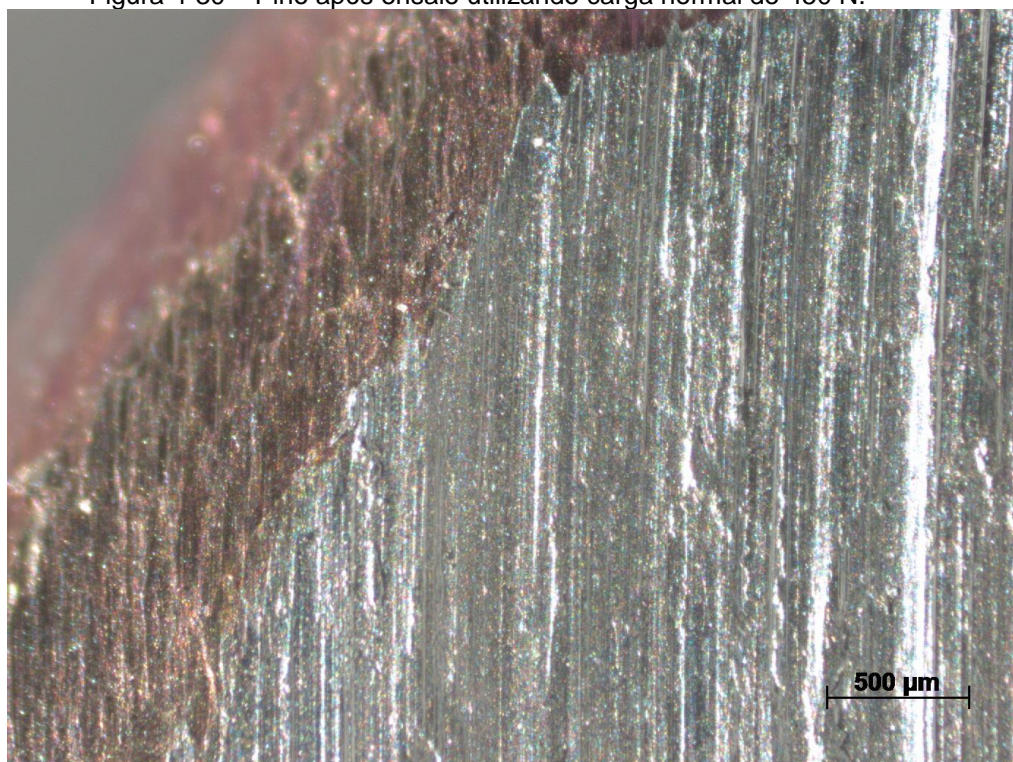


Figura 4-31 – Pino após ensaio utilizando carga normal de 450 N – detalhe da borda.

A maior carga utilizada neste trabalho foi 500 N. As duas amostras utilizadas apresentaram resultados bastante similares, como mostra a Figura 4-32. Após apenas alguns segundos o conjunto pino-disco travou, não havendo mais movimento relativo e o ensaio foi interrompido.

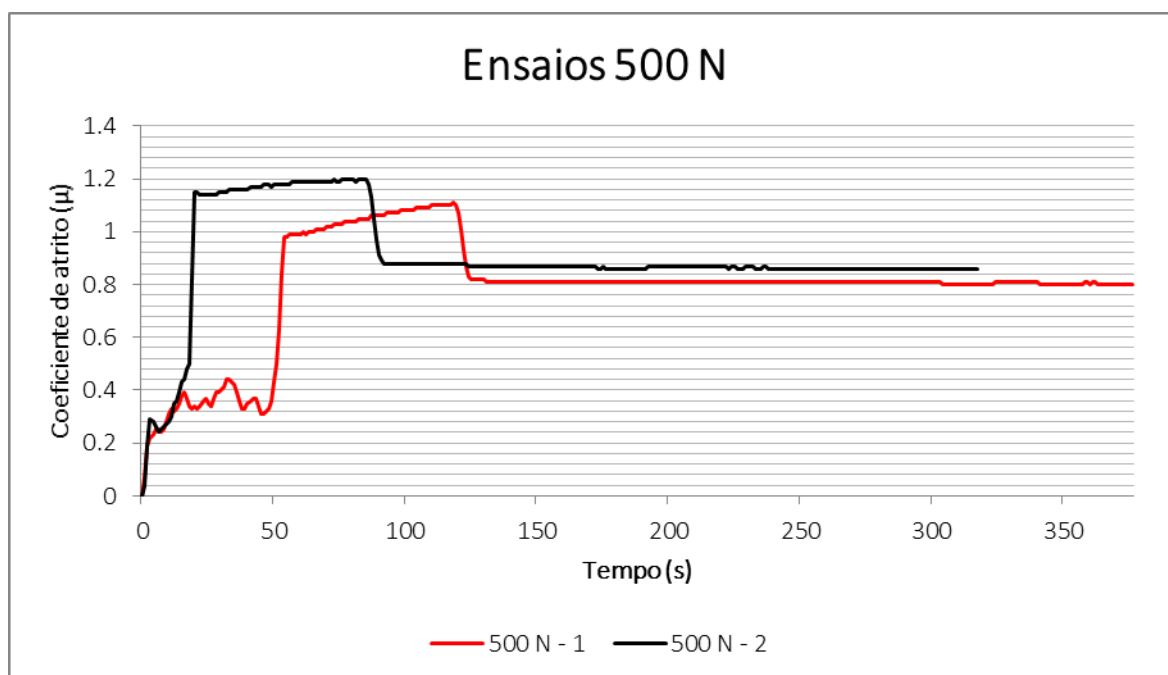


Figura 4-32 – Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio com 500 N de carga normal.

A Figura 4-33 mostra o aspecto visual da trilha de desgaste para carga normal de 500 N, enquanto a Figura 4-34 mostra o perfil topográfico para o mesmo ensaio. As setas da Figura 4-33 indicam tanto a presença de depósitos de material, característica do *galling*, quanto a ausência de formação da trilha de desgaste em alguns trechos.

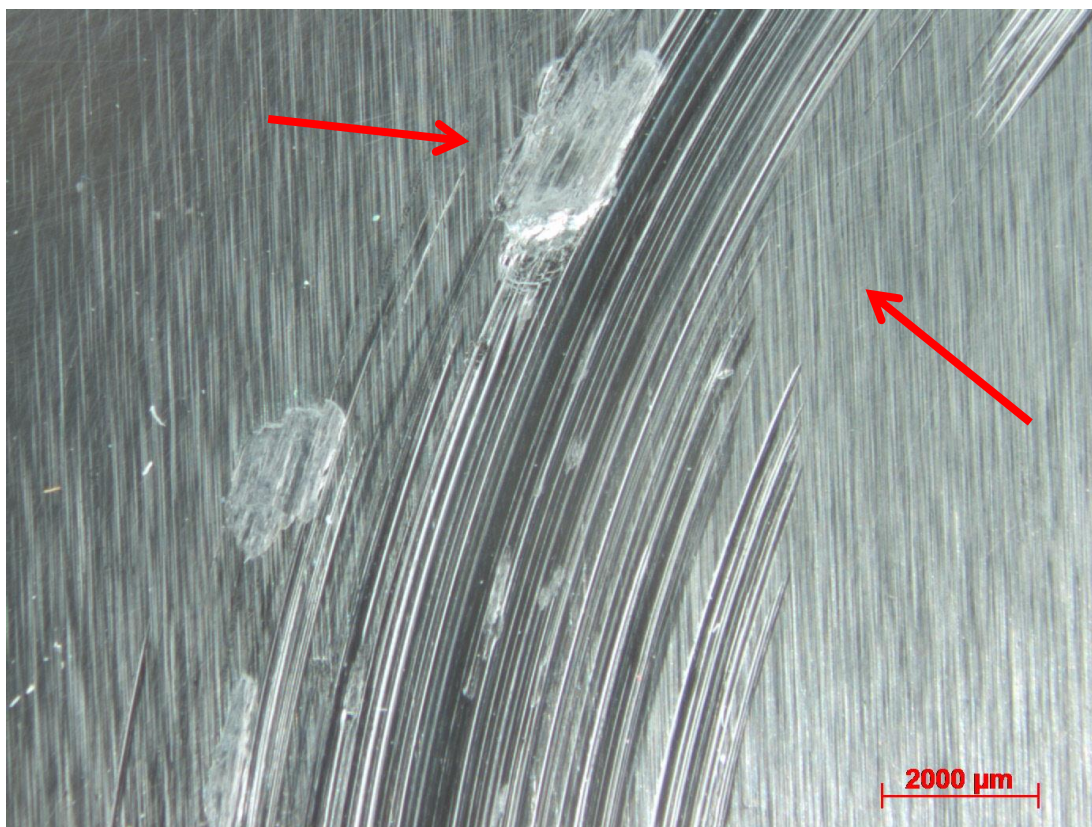


Figura 4-33 – Trilha de desgaste para a carga normal de 500 N.

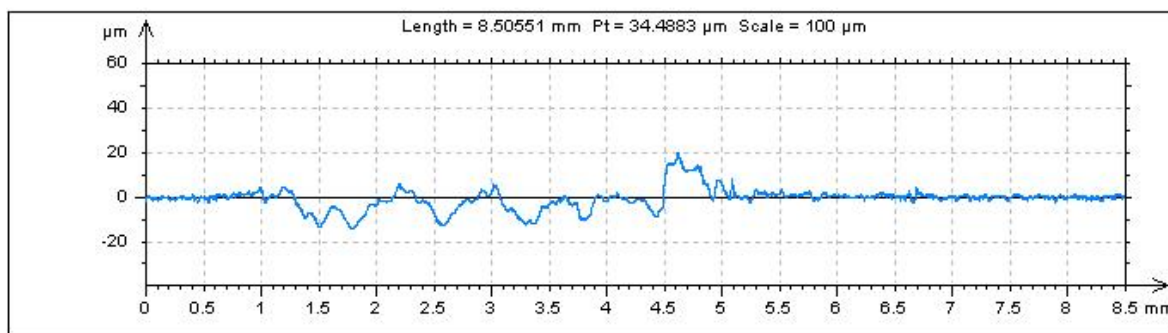


Figura 4-34 – Perfil topográfico mostrando a trilha de desgaste para 450 N de carga normal.

Nos pinos utilizados nos ensaios com 500 N de carga normal, houve grande deformação plástica e a presença de protusões, Figura 4-37 e 4-38.

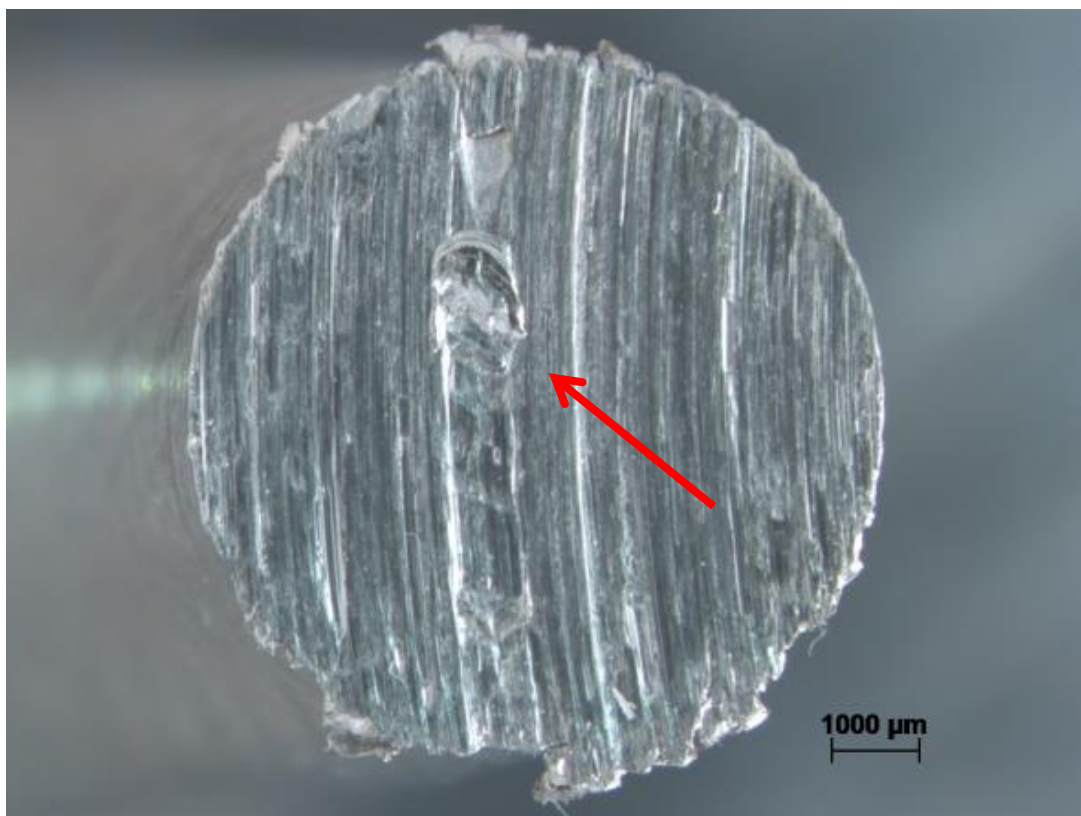


Figura 4-35 – Pino após ensaio utilizando carga normal de 500 N – seta indicando a protusão.

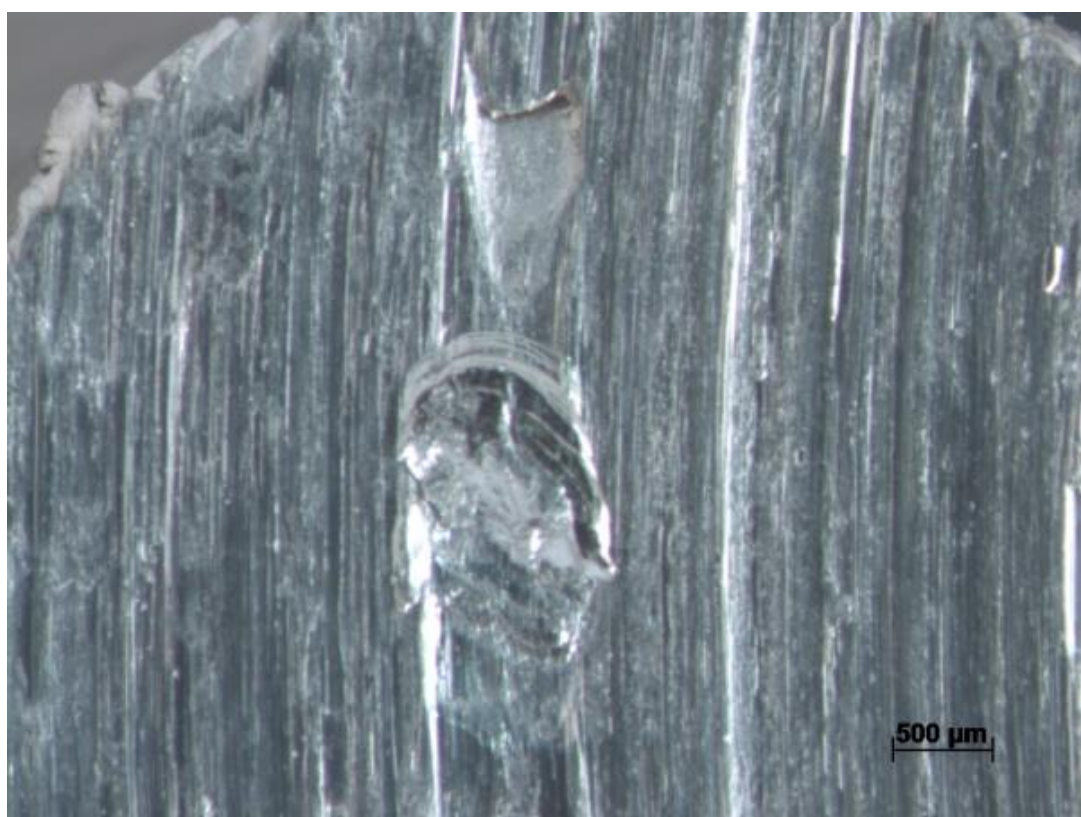


Figura 4-36 – Protusão formada no pino – detalhes da Figura 4-37.

Para os ensaios com cargas normais de 350, 400, 450 e 500 N, um gráfico com os coeficientes de atrito médio não é representativo do processo tribológico.

O aumento da carga normal para valores acima de 220 N provocou a diminuição do volume de desgaste, Figura 4-37. Para 500 N, foi detectado um volume de desgaste “negativo”, o que representou um acréscimo (de 2,25 m³) ou transferência de material para a superfície da trilha de desgaste do disco. Além disso, o tempo de ensaio para este material foi menor, pois foi interrompido antes, devido ao travamento do par pino-disco.

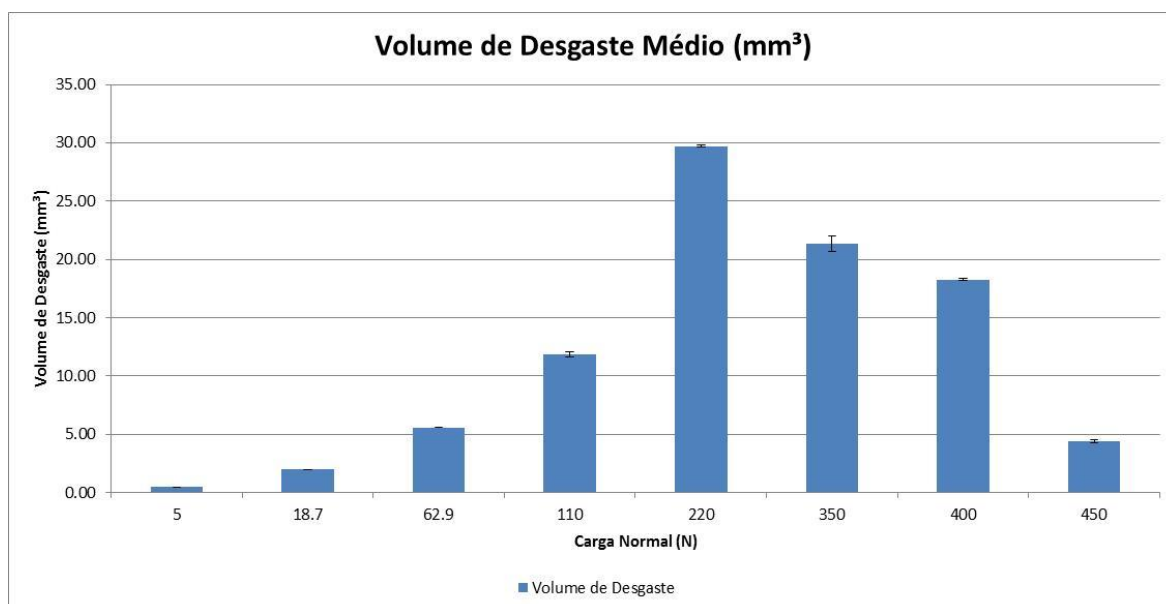


Figura 4-37 – Comportamento para o disco do volume de desgaste com o aumento da carga.

Além disso, o coeficiente de desgaste dimensional também acompanhou essa tendência de aumento para cargas de até 220 N, seguido de diminuição com o acréscimo da carga normal, como mostrado na FIGURA 4-38:

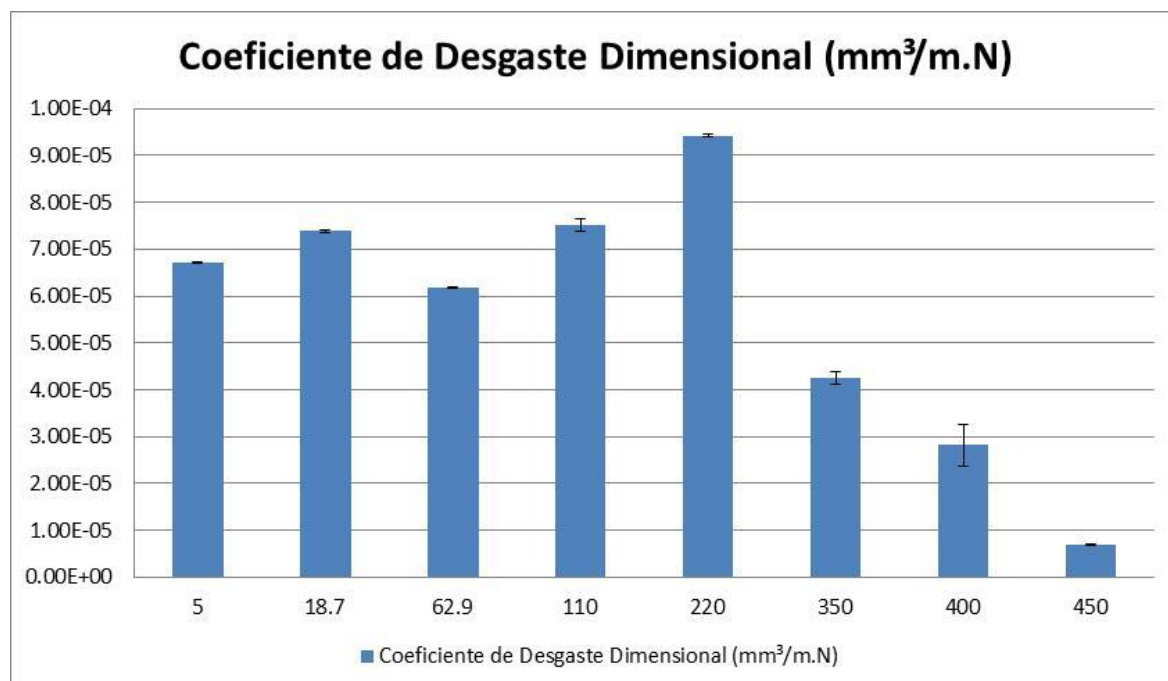


Figura 4-38 – Comportamento para o disco do coeficiente de desgaste dimensional com o aumento da carga.

Para se ter uma perspectiva visual da amplitude da influência da carga normal na formação da trilha de desgaste, estas serão dispostas lado a lado para comparação, Figura 4-39.

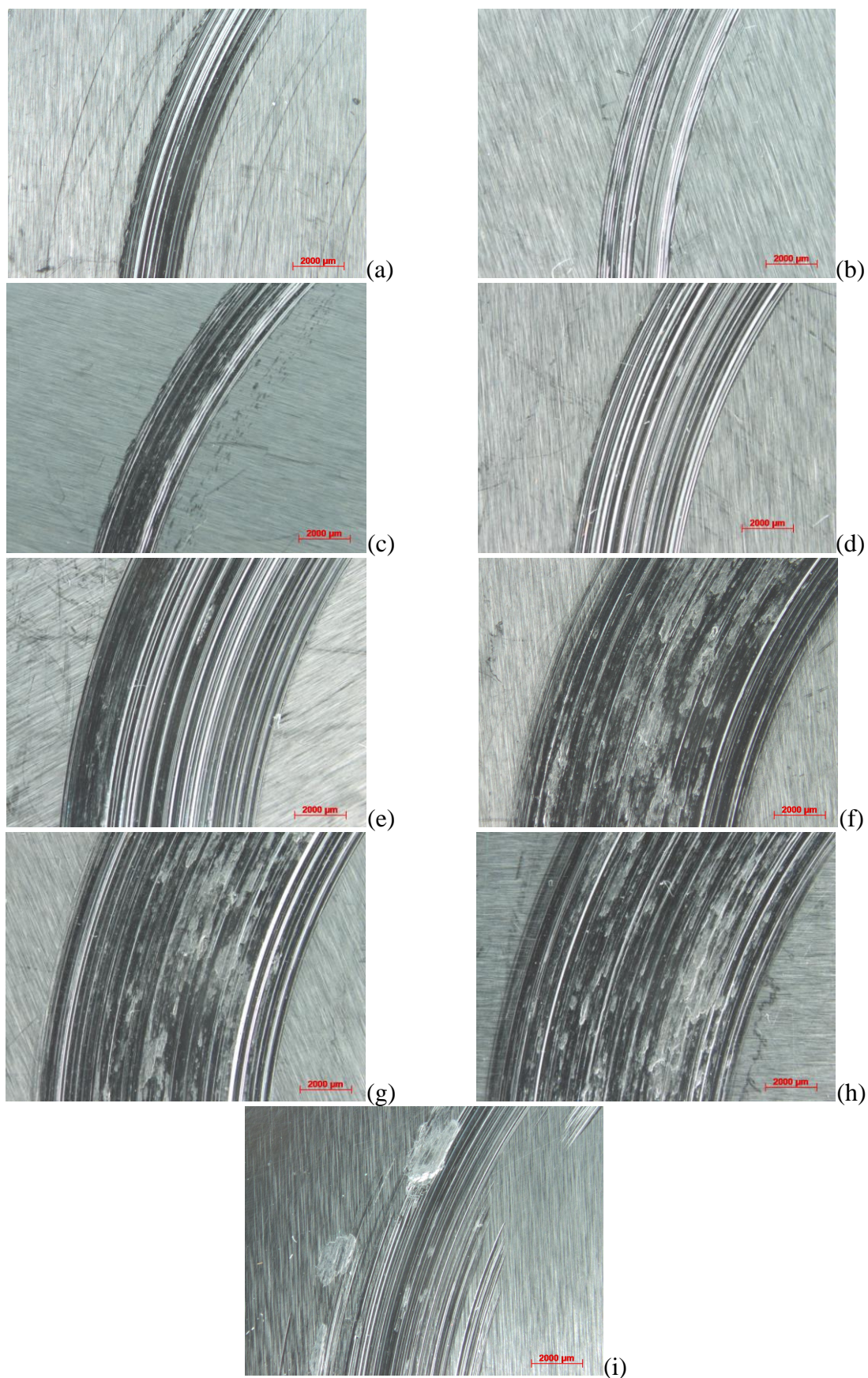


Figura 4-39 – Evolução da trilha de desgaste com o aumento da carga normal – Microscópio Estereoscópico – Cargas: (a) 5 N; (b) 18,7 N; (c) 62,9 N; (d) 110 N; (e) 220 N; (f) 350 N; (g) 400 N; (h) 450 N e (i) 500 N.

Em diversos ensaios houve grande acúmulo de debris no contato que, posteriormente, se compactaram neste contato ou aderiram ao pino. O magnetismo do pino foi importante neste aspecto, como mostrado na Figura 4-40.

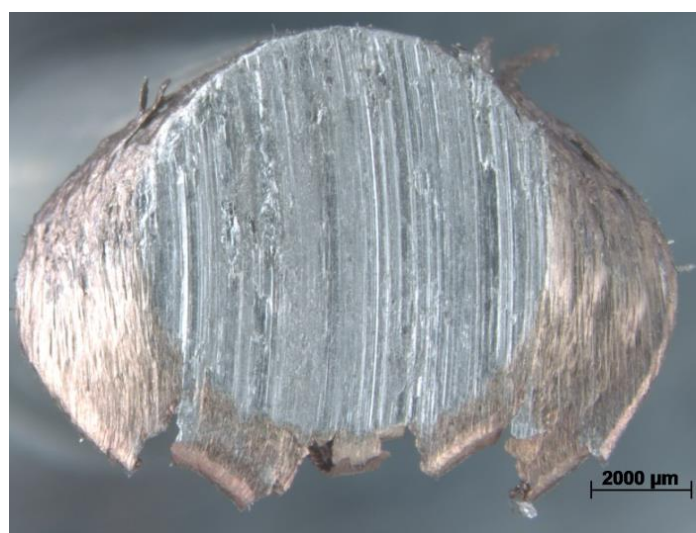
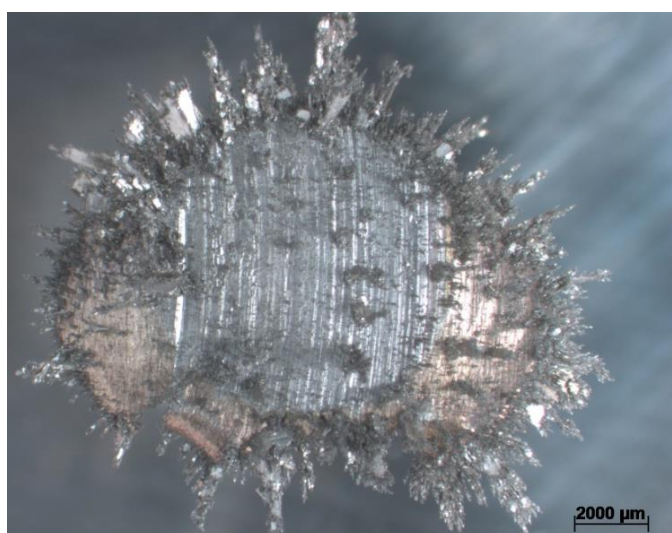


Figura 4-40 – Comparação antes e depois da limpeza do pino no 5º ensaio utilizando 400 N de carga normal – Influência do magnetismo do pino na atração dos debris.

4.2.1. Fenômeno do Baixo Atrito

O fenômeno aqui reportado, isto é, um baixíssimo atrito no deslizamento a seco de pares metálicos, não encontra relatos na literatura. Assim, a descrição deste

será feita tanto por aspectos quantitativos como qualitativos, a fim de que se possa descrevê-lo da maneira mais fiel possível.

Independente da carga utilizada, parece haver 3 fases ou etapas de evolução do coeficiente de atrito com o tempo que se repetem em todos os ensaios. Estas etapas serão exemplificadas na Figura 4-41 e descritas nos próximos tópicos.

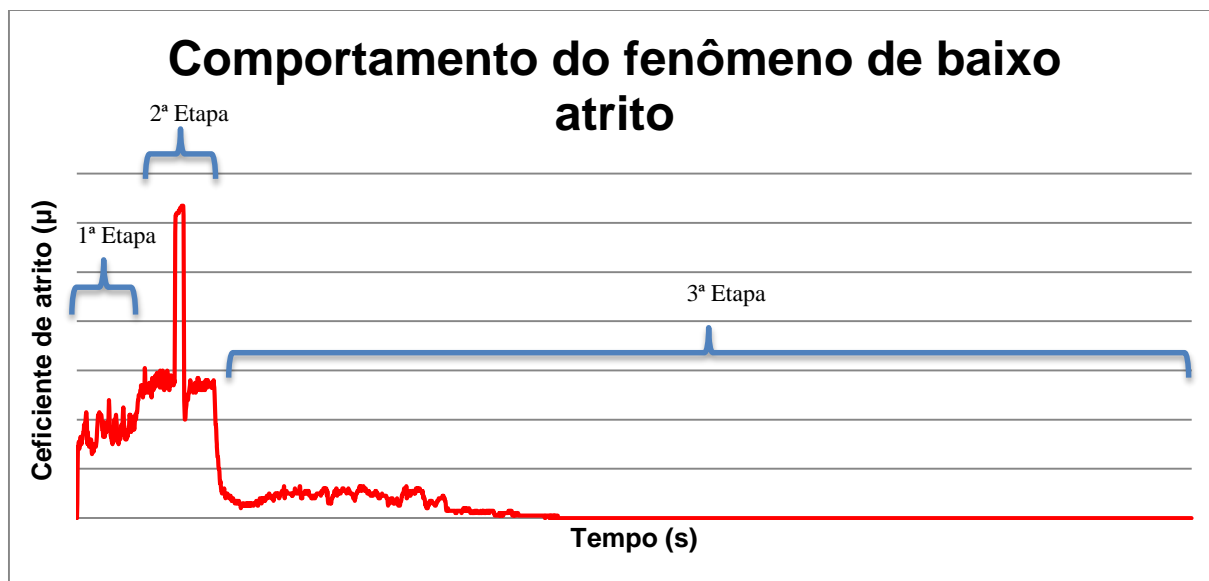


Figura 4-41 – Evolução do coeficiente de atrito típico nos ensaios que resultaram em um baixíssimo atrito.

4.2.1.1. 1ª Etapa – Médio Atrito, Médio Desgaste

O atrito passa por um período inicial com oscilação do μ e se estabiliza. A trilha de desgaste vai se formando. Em um determinado momento, com a trilha já desenvolvida, o desgaste começa a aumentar. Os debris, que antes eram finos, passam a ser grosseiros. Decorrido algum tempo nestas condições, pode ocorrer, ou não, o travamento do par, acompanhado do aumento do atrito.

4.2.1.2. 2ª Etapa – Alto Atrito, Alto Desgaste

Nesta etapa, o coeficiente de atrito atinge elevados valores e os debris de desgaste ficam ainda mais grosseiros. Os ruídos sonoros aumentam

significativamente e ocorre um aquecimento do conjunto. Os debris passam a se aglomerar ao pino, formando uma borda aderida a este, Figura 4-40.

4.2.1.3. 3ª Etapa – Baixíssimo Atrito, Baixo Desgaste

A seguir, de modo quase instantâneo, o atrito cai bruscamente. O ruído sonoro praticamente desaparece. Os debris passam a ser poucos e muito finos. Depois de atingir essa etapa, o atrito permanece estável, nesse baixíssimo nível, até o término do ensaio.

4.2.2. Transformação de Fase

Um outro aspecto a ser analisado era a ocorrência ou não da transformação de fase CFC→HC. Para tanto, procedeu-se à análise do espectro de difração de 3 amostras do disco nas seguintes condições: material “como recebido”, trilha de desgaste após término dos ensaios que atingiram o baixo atrito e amostra retirada do interior do disco através de eletroerosão. O disco na condição “como recebido” já apresentava picos HC nas famílias de direções $\langle 1\ 0\ -1\ 0 \rangle$ e $\langle 1\ 0\ -1\ 1 \rangle$. Isso se explica pelo fato deles terem sofrido um trabalho mecânico de usinagem (corte) para se chegar as dimensões desejadas, além de terem a superfície retificada.

Com o desgaste provocado pelos ensaios, os picos característicos da estrutura CFC praticamente desaparecem, dando lugar aos HC. A Figura 4-42 mostra o difratograma de raios-X, onde se observa a transformação de fase CFC-HC do material como recebido para a trilha de desgaste.

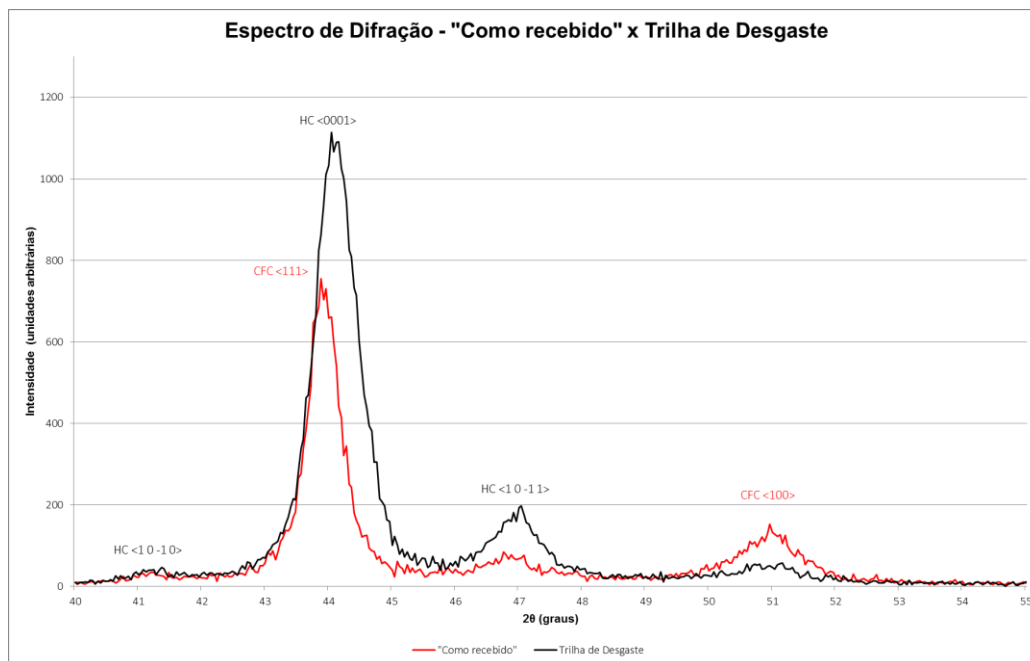


Figura 4-42 – Difratoograma de raios-X das amostras nas condições “como recebido” e da trilha de desgaste.

Esse resultado era esperado tendo em vista o comportamento de outros Stellites [4, 5]. As Figuras 2-7 e 4-43 mostram essa transformação de fase após o trabalho mecânico:

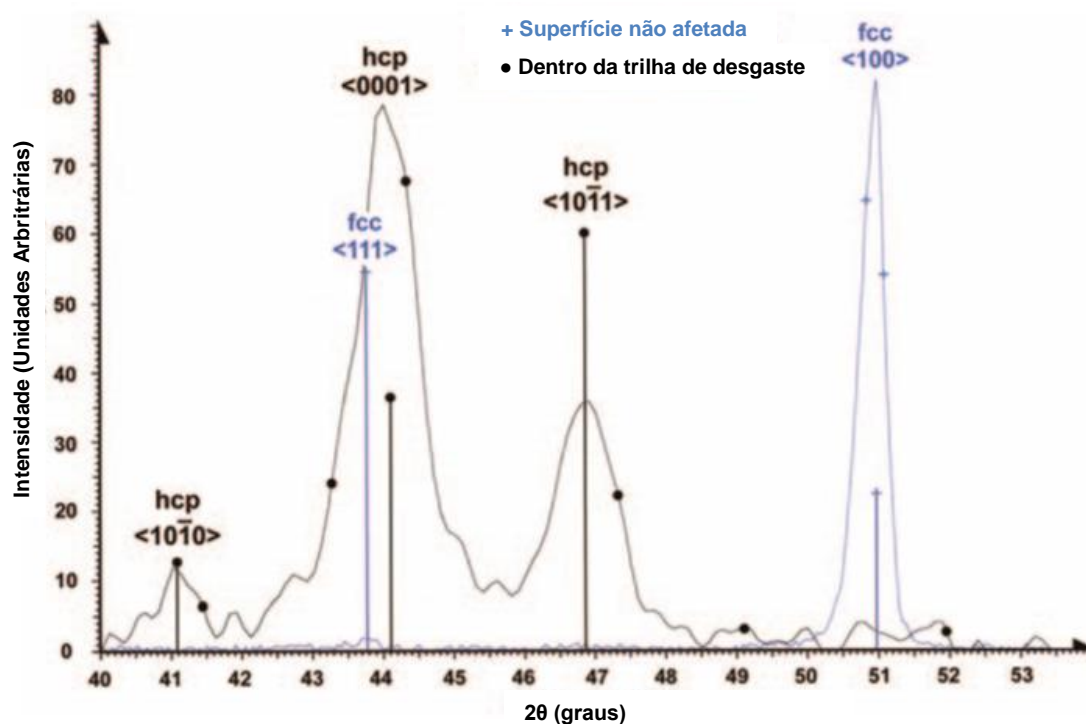


Figura 4-43 – Difratoograma de raios-X de um Stellite® 21 sem deformação plástica observável (marcado com um +) e após o desgaste (marcado com um •). As barras indicam as posições esperadas e as intensidades relativas dos picos de difração de um material policristalino, não texturizado em CFC e solução sólida rica em Co HC, respectivamente. [5]

A seguir, é apresentado o gráfico do material retirado via eletroerosão e o comparativo dos 3 materiais, Figuras 4-44 e 4-45. A Figura 4-44, amostra retirada via eletroerosão, indica que o material ainda não submetido a esforços mecânicos apresenta grandes picos CFC $\langle 111 \rangle$ e $\langle 100 \rangle$. Analisando o gráfico da Figura 4-45, é possível ver que, conforme o material vai sendo trabalhado mecanicamente, os picos CFC realmente diminuem e os HC aumentam.

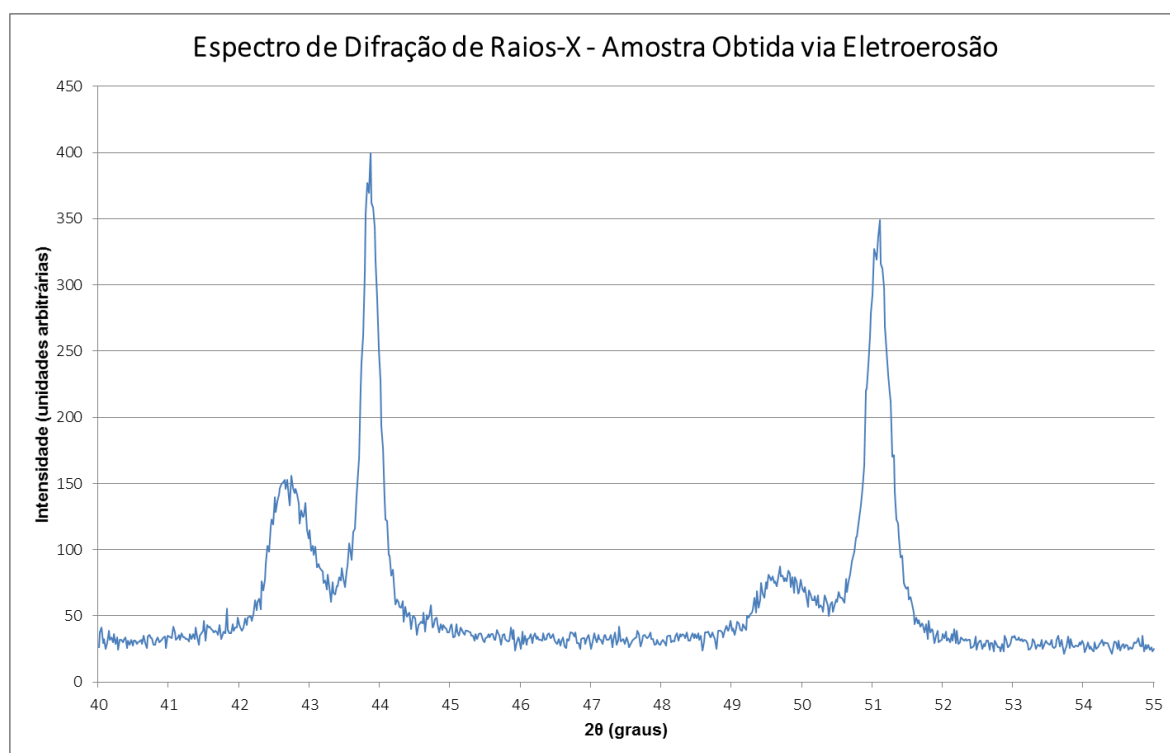


Figura 4-44 – Difratoograma de raios-X de uma amostra do Alloy 250 obtida via eletroerosão.

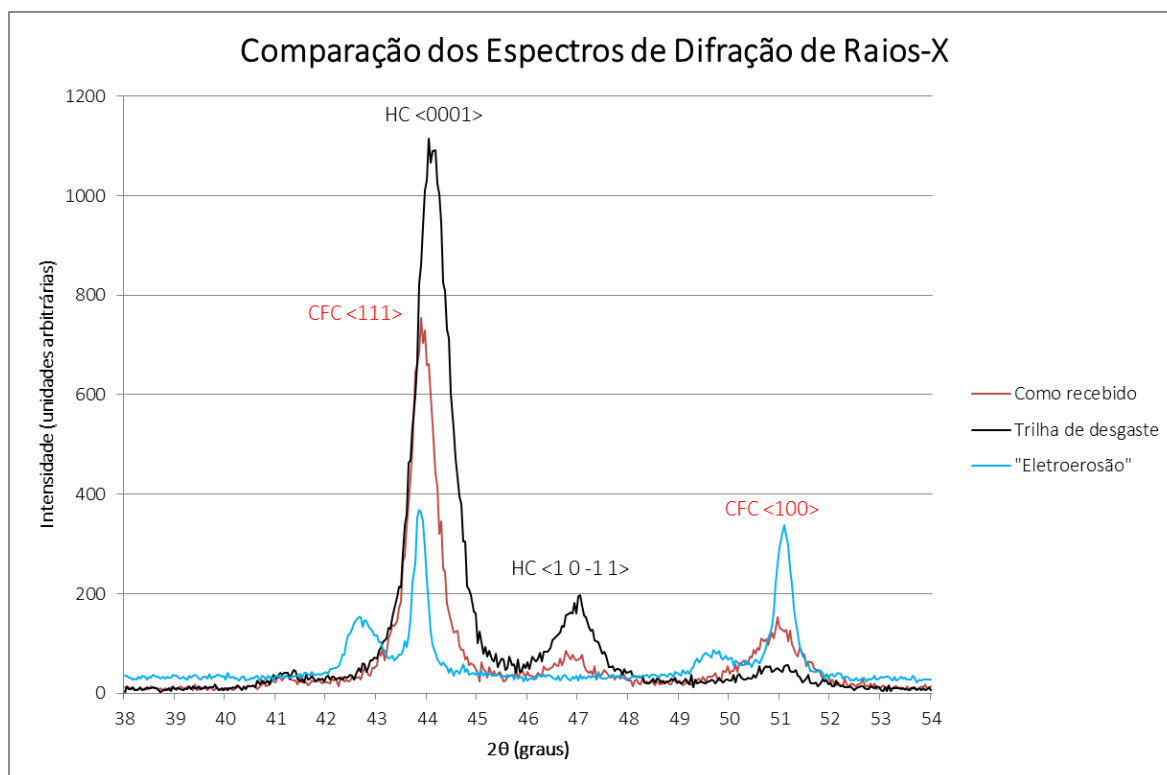


Figura 4-45 – Comparação dos espectros de difração de raios-X das amostras de Alloy 250.

Observou-se, conforme mostrado na figura 4-48, que a intensidade da transformação foi maior para cargas acima de 220 N, Figura 4-46. Acima deste patamar, parece haver uma relação do aumento da intensidade do pico HC <0001> com o aumento da carga.

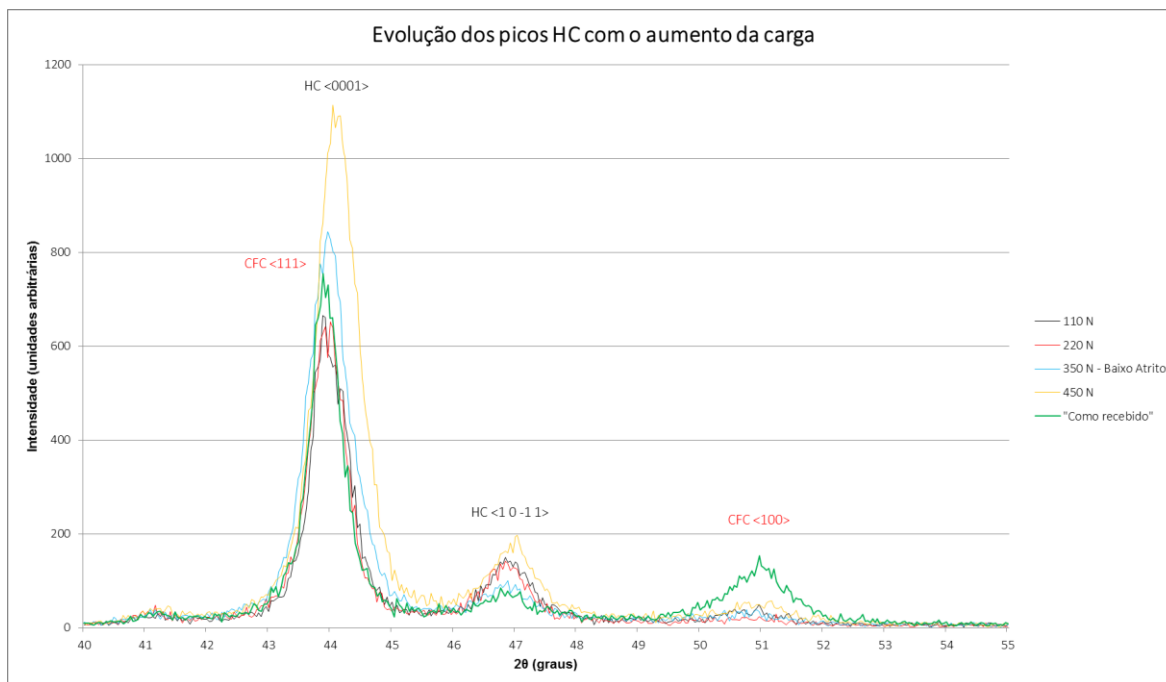


Figura 4-46 – Evolução dos picos HC com o aumento da carga.

A transição no atrito, isto é, o fenômeno de baixo atrito, ocorreu para cargas maiores que 350 N (350, 400 e 450 N) e o baixo atrito parece ser controlado pelo cisalhamento da família de planos basais $\{0001\}$ [4].

4.2.3. Endurecimento Sub-superficial

Foi possível verificar o aumento da dureza na trilha de desgaste ocorrido em direção à superfície de desgaste, Figura 4-47, a semelhança do trabalho de Persson [5] exibido na Figura 2-9. É possível observar na Figura 4-47, que a profundidade de endurecimento é de cerca de 0,1 mm, com a dureza aumentando de cerca de 300 $HV_{0,05}$ para aproximadamente 500 $HV_{0,05}$ próximo da superfície. Cada ponto no gráfico é uma média de aproximadamente 11 medidas de dureza.

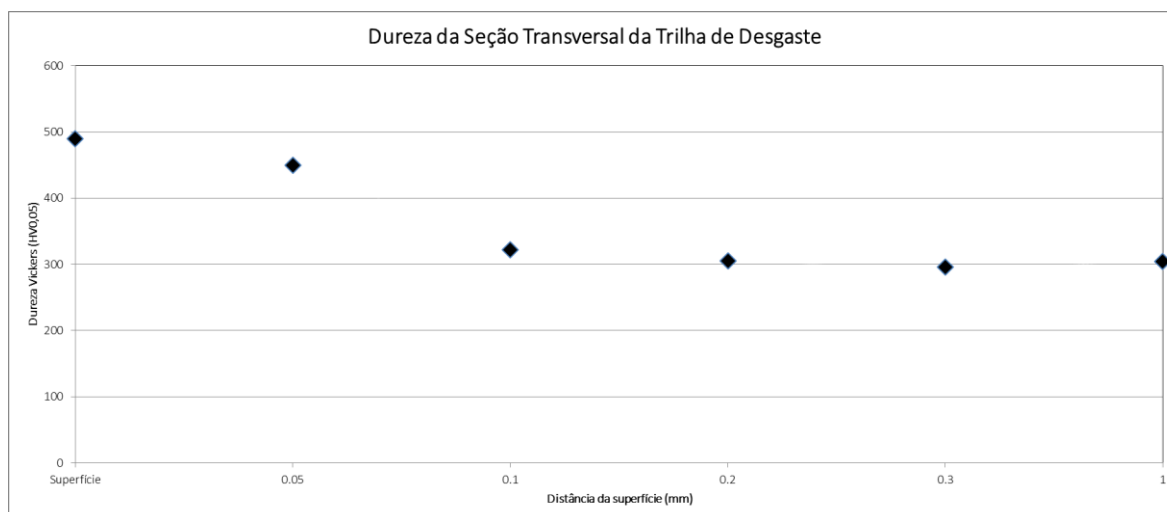


Figura 4-47 – Perfil de dureza da seção transversal da trilha de desgaste.

4.2.4. Potencial elétrico de contato

Dos 9 ensaios que apresentaram o baixo atrito, em 5 verificou-se o aumento simultâneo do potencial elétrico de contato com a diminuição do atrito, Figuras (4-48 a 4-52).

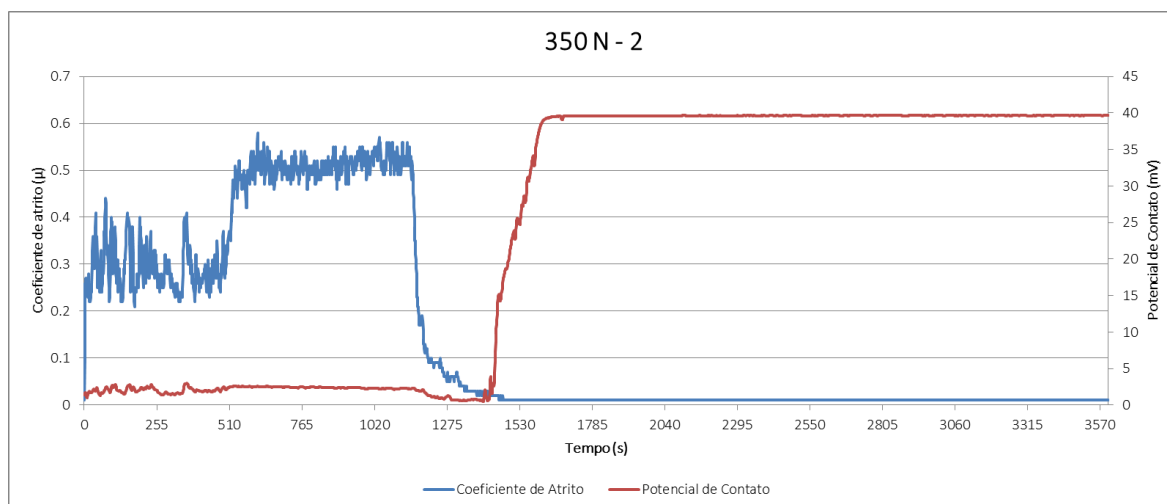


Figura 4-48 – Evolução no tempo do coeficiente de atrito e do potencial de contato – 350 N – 2º ensaio.

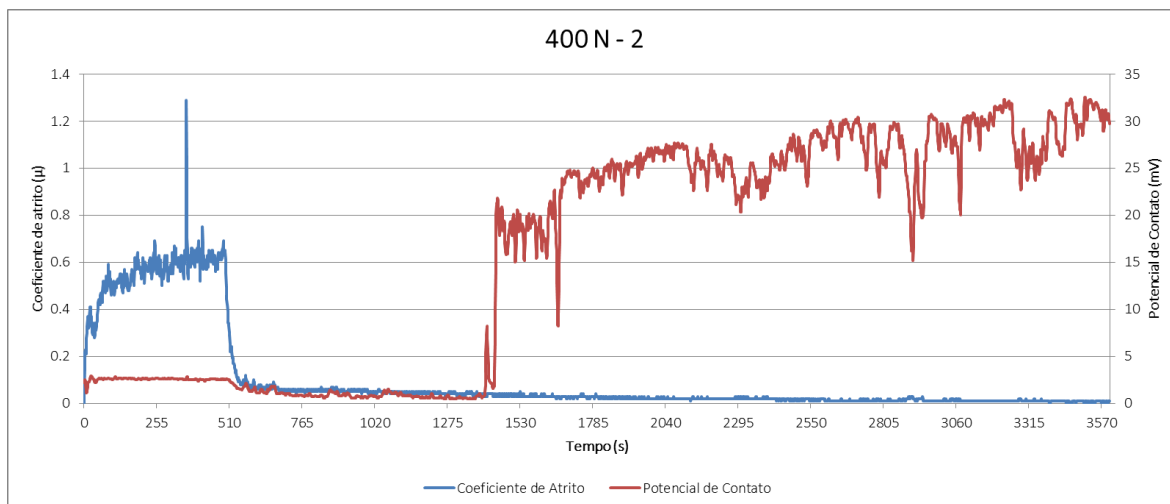


Figura 4-49 – Evolução no tempo do coeficiente de atrito e do potencial de contato – 400 N – 2º ensaio.

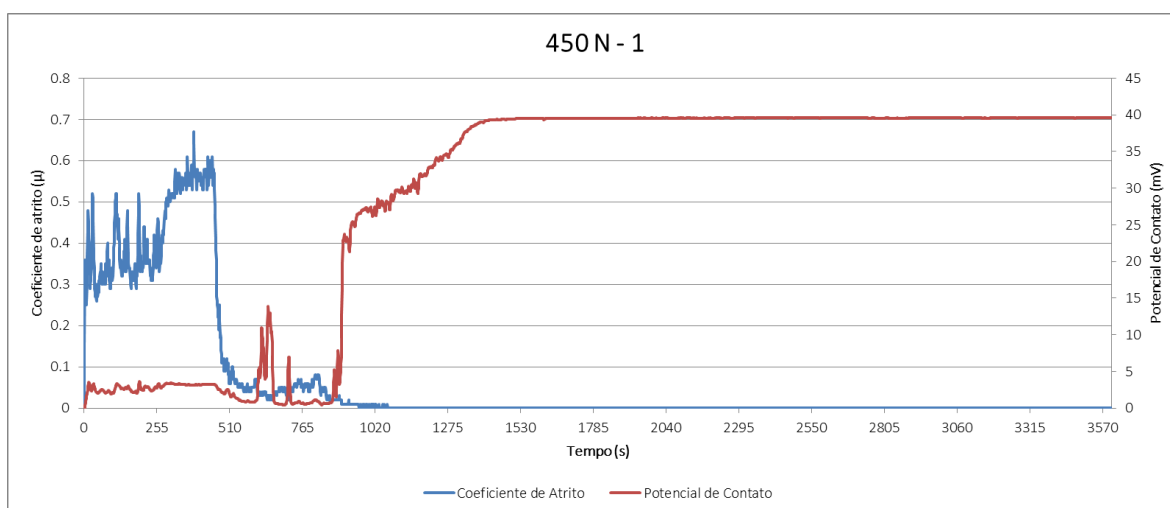


Figura 4-50 – Evolução no tempo do coeficiente de atrito e do potencial de contato – 450 N – 1º ensaio.

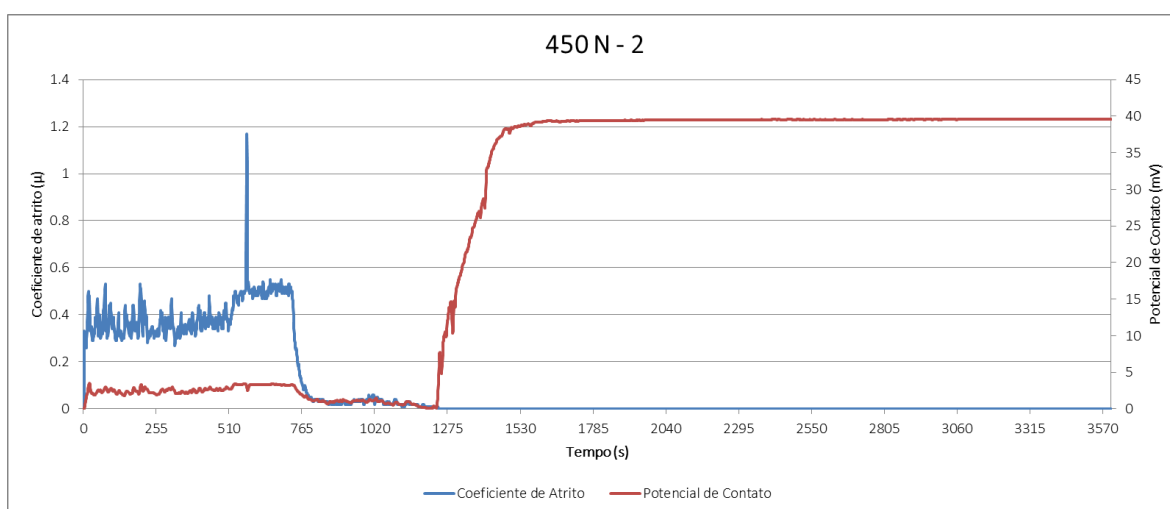


Figura 4-51 – Evolução no tempo do coeficiente de atrito e do potencial de contato – 450 N – 2º ensaio.

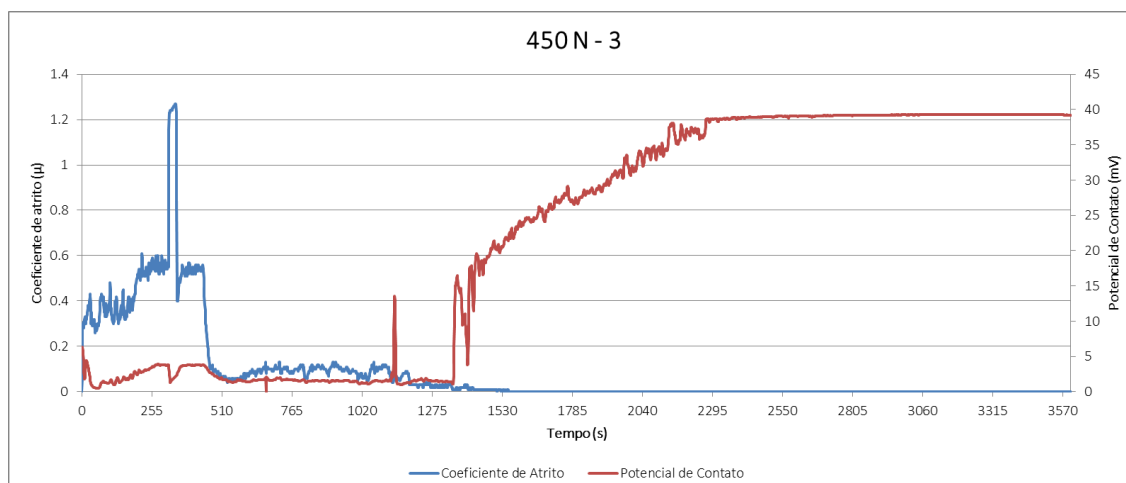


Figura 4-52 – Evolução no tempo do coeficiente de atrito e do potencial de contato – 450 N – 3º ensaio.

O aumento do potencial elétrico de contato está relacionado com a dificuldade de uma corrente elétrica atravessar a região do contato. Este fenômeno está possivelmente relacionado com debris oxidados e compactados no contato.

Estes resultados sugerem que pode haver uma certa contribuição da camada superficial de óxidos para os baixos níveis de atrito observados, diferentemente do trabalho de Persson et alli [4], onde os níveis de atrito mantiveram-se nos mesmo patamares, mesmo sem a presença de óxidos, Figura 2-10.

4.2.5. Formação de uma Fina Camada Facilmente Cisalhável

É possível que tenha ocorrido, a semelhança do trabalho de Persson [5], a formação de uma camada muito fina, com estrutura HC texturizada com os planos basais, orientada paralelamente à direção do deslizamento. Esta camada é autorregenerável e facilmente cisalhável.

Levando tudo o que foi apresentado e discutido até agora, vê-se que o presente trabalho apresentou diversas características que se assemelham com as investigações de Persson et al [4,5,6,7]. Assim, aparentemente, aqui também tem-se um sistema de baixo atrito muito parecido com o da Figura 2-11, próprio dos Stellites. A grande diferença foi o coeficiente de atrito muito baixo obtido em diversos ensaios.

5. CONCLUSÕES

Nesse par tribológico, os valores de atrito alcançados creditam-se a uma sinergia e otimização dos seguintes eventos:

- Endurecimento sub-superficial;
- Transformação de fase;
- Alinhamento (texturização) da família de planos basais {0001} e
- E uma possível contribuição da transferência de material do pino para a trilha de desgaste.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

- Caracterização da superfície e subsuperfície de desgaste através de um Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET);
- Realização de ensaios em atmosfera controlada, sem a presença de oxigênio;
- Utilização de contra-corpos (pinos) de outros materiais;
- Realização de ensaios de longa duração.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. DE MELLO, J. D. B.; SINATORA, A. **Materiais avançados no Brasil 2010-2022**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília, p. 360, 2010.
- [2]. FLEITMAN, A.H., HERCHENROEDER, R.B., CHOW, J.G.Y., **COBALT-BASE ALLOYS FOR USE IN NUCLEAR REACTORS**, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA, Recebido em 17/04/1970
- [3]. BHANSALI, K. J., MILLER, A.E. **The role of stacking fault energy on galling and wear behavior**, American Society of Engineering Education Internship, Wear Technology Division, Cabot Corporation, Kokomo, IN (U.S.A.) (Received July 14,1981), WEAR, 75, pg 241-252, 1982
- [4]. PERSSON, D.H.E., JACOBSON, S., HOGMARK, S., **The influence of phase transformations and oxidation on the galling resistance and low friction behaviour of a laser processed Co-based alloy**, WEAR 254, pg 1134-1140, ELSEVIER, 2003
- [5]. PERSSON, D.H.E. **On the mechanisms behind the tribological performance of Stellites**, Acta Universitatis Upsaliensis, Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 129, 51pp., Uppsala, ISBN 91-554-6420-3, 2005
- [6]. PERSSON, D.H.E, CORONEL, E., JACOBSON, S., HOGMARK, S. **Surface analysis of laser cladde Stellite exposed to self-mated high load dry sliding**, WEAR 261, pg 96-100, ELSEVIER, 2006
- [7]. PERSSON, D.H.E., JACOBSON, S., HOGMARK, S., **Effect of temperature on friction and galling of laser processed Norem 02 and Stellite 21**, WEAR 255, pg 498-503, ELSEVIER, 2003
- [8]. HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Ed. Edward Arnold, London, 1992.
- [9]. ASM – American Society for Metals, **Metals Handbook, Vol. 18 - Friction, Lubrication and Wear Technology**; USA,1992.
- [10]. BOWDEN, F.P.; TABOR, D., **The Friction and Lubrication of Solids**, Part I, Ch. V, Clarendon Press, Oxford 1950
- [11]. BLAU, P. J., **Embedding wear models into friction models**, Tribol Lett (2009), 34:75-79, Springer Science+Business Media, LLC2008
- [12]. BLAU, P. J. **The significance and use of the friction coefficient**; ELSEVIER, Tribology International 34 (2001) 585-591 – Oak Ridge National Laboratory, P.O. Box 2008 Mail Stop 6063, Oak Ridge, TN 37831-6063

- [13]. BLAU, P.J. **Four great challenges confronting our understanding and modeling of sliding friction**, Em: Downson D, Taylor CM, Childs THC, Dalmaz G, Berthier Y, Flamand L, Georges JM, Lubrecht AA, editors. – Tribology for energy conservation. Amsterdam: Elsevier, 1998:177-228
- [14]. BLAU, P. J. **Friction Science and Technology**, New York: Marcel Dekker – 1986:266
- [15]. BLAU, P. J., **Friction Science and Technology**, USA, Marcel Dekker, 1996
- [16]. BUSHAN, B., **Modern Tribology Handbook**, CRC Press, 2001
- [17]. ZUM GAHR K. H. **Microstructure and wear of materials**. Elsevier, 1987.
- [18]. BUSHAN, B., **Introduction to tribology**, Wiley & Sons, 2002
- [19]. RIGNEY, D. A. **Comments on the sliding wear of metals**, Tribology International Vol 30, No 5 pp. 361-367, ELSEVIER, 1997
- [20]. RIGNEY, D. A., **The roles of hardness in the sliding behaviour of materials** WEAR, 175, pgs 63-69, 1992
- [21]. MARKOV, D., KELLY, D., **Mechanisms of adhesion-initiated catastrophic wear: pure sliding**, WEAR 239, pg 189-210, 2000
- [22]. ASM International, **Specialty Handbook Nickel, Cobalt and their Alloys**, USA, 1ª edição, 2000
- [23]. ASM International, **Superalloys – A technical Guide**, USA, 2ª edição, 2002
- [24]. ASM International, **Specialty Handbook – Heat-Resistant Material**, USA, 1997
- [25]. INFOMET (<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=106>) Data de acesso: 2/12/2014
- [26]. BROOKS, C.R., **Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys**, ASM, Metals Park, Ohio, USA, chapter 6, p. 229 – 252, 1982
- [27]. TOLÉDANO, P., KREXNER, G., PREM, M., WEBER, H.-P., DMITRIEV, V.P., **Theory of the martensitic transformation in cobalt**, Physical Review B, Volume 64, 144104, 2001
- [28]. DUNCKLEY, P.M., QUINN, T.F.J., SALTER, J., **Studies of the unlubricated wear of a commercial cobalt-base alloy at temperatures up to about 400°C**, ASLE Trans, 19 (3), pgs 221-231, 1976
- [29]. SO, H., CHEN, C.T., CHEN, Y.A., **Wear behaviours of laser-clad stellite alloy 6**, Wear 192 (1-2), pgs 78-84, 1996
- [30]. Zaplatynsky, I., **Volatization of oxides during oxidation of some superalloys at 1200°C**, Oxidation Metals 11 (6), pgs 289-305, 1977
- [31]. Hitachi Metals (http://www.hitachi-metals-sa.co.jp/e/products/heatresist_umco50.html) Data de acesso: 2/12/2014
- [32]. Manual da PLINT